

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

«На правах рукопису»  
УДК 681.5: 669.1

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ А.І. Жученко  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інформаційні технології**  
(код і назва)

на тему: «Система керування процесом прожарювання коксу та антрациту в  
обертовій барабанній печі»

Виконав: студент 6 курсу, групи ЛА-61м

\_\_\_\_\_ Тугай Євгенія Вікторівна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Жученко О.А. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Інженерно-хімічний факультет**

(повна назва)

**Кафедра автоматизації хімічних виробництв**

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інформаційні технології  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ А. І. Жученко  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Тугай Євгенії Вікторівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Система керування процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі»,

науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ доц., к. т. н. Жученко О. А.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «21» березня 2018 р. № 979-с

2. Термін подання студентом дисертації 18 травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження Процес виробництва графітованих електродів \_\_\_\_\_

4. Предмет дослідження Математична модель процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі; системи керування температурним режимом в обертовій барабанній печі: класична система з використанням ПІ-регулятора, адаптивна система з використанням ПІ-регулятора та система з використанням LQR-регулятора.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести аналіз схеми технологічного процесу; вказати особливості перебігу процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі; розробити математичну модель обертової барабанної печі; дослідити системи керування

температурним режимом барабанної печі на основі використання:  
звичайного ПІ-регулятора, адаптивного ПІ-регулятора та LQR-регулятора.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу матеріали презентації до  
захисту магістерської дисертації

---

7. Орієнтовний перелік публікацій:

- Тугай Є. В., Жученко О.А Аналіз процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі [Текст] / Є. В. Тугай, О. А. Жученко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Матеріали Четвертої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2016); Київ, НТУУ «КПІ», 20–21 квітня 2017 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 138 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – 150 пр.
- Тугай Є. В., Жученко О. А Моделювання процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Тези доповідей Десятої науково-практичної конференції студентів. - Київ, НТУУ «КПІ», 8 грудня 2017 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2017..
- Тугай Є. В., Жученко О. А. Математичне моделювання процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі [Текст] / Є. В. Тугай, О. А. Жученко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Матеріали П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2018); Київ, НТУУ «КПІ», 11 квітня 2018 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2018. – 140 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез.
- Тугай Є. В. Математична модель процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі / Жученко О. А., Тугай Є. В., Коротинський А. П. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» – №2, 2018.
- Заявка на корисну модель «Рекуперация обертОВОЙ барабанной печи»

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завданн я прийняв

9. Дата видачі завдання: 29 березня 2018 року

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Опис технологічного процесу та об'єкта керування	15.03.2018	
2	Математичне моделювання процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі	6.04.2018	
3	Дослідити систему керування температурним режимом з використанням адаптивного ПІ-регулятора	14.04.2018	
4	Дослідити систему керування температурним режимом з використанням ПІ-регулятора	19.04.2018	
5	Розробка стартап-проекту	01.05.2018	
6	Оформлення матеріалів до магістерської дисертації	05.05.2018	
7	Оформлення слайдів презентації PowerPoint	13.05.2018	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Є. В. Тугай

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

О. А. Жученко

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)



## РЕФЕРАТ

Основною задачею магістерської дисертації є створення та дослідження різних систем керування температурним режимом обертової барабанної печі в процесі прожарювання коксу та антрациту: класичної системи з використанням ПІ-регулятора, системи з використанням адаптивного ПІ-регулятора, , системи з використанням  $LQR$ -регулятора.

У магістерській дисертації об'єктом дослідження є процес прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі. Предметом дослідження є математичка модель обертової барабанної печі. Також досліджено особливості роботи технологічного апарату як об'єкта керування, для якого проведено математичний опис для синтезу системи керування температурою.

Було розроблено стартап-ідею, щодо створення рекупераційного обладнання на виробництві для раціонального використання виділеної теплоти.

Відповідно до теми магістерської дисертації надруковано 3 тез, подано статтю до друку та заявку на корисну модель.

Магістерська дисертація містить пояснювальну записку об'ємом 81 сторінку. Пояснювальна записка містить 21 рисуноків, 22 таблиць, 27 літературних джерел.

Результати роботи можуть бути використані та впроваджені в системах керування виробництвом графітованих електродів. Розроблені в програмному пакеті *Matlab* моделі та схеми систем керування можуть бути використані в курсах «Спеціальні розділи теорії автоматичного керування» та «Адаптивні та робастні системи».

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** КОКС, АНТРАЦИТ, ОБЕРТОВА БАРАБАННА ПІЧ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, АДАПТИВНИЙ РЕГУЛЯТОР, КОНТУР КЕРУВАННЯ, ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,  $LQR$ -РЕГУЛЯТОР, СТАРТАП.

## **ABSTRACT**

The main task of the master's dissertation is the creation and research of various systems of control of the temperature regime of a rotating drum kiln in the process of calcination of coke and anthracite: a classical system using a PI regulator, a system using an adaptive PI regulator, and a system using the LQR regulator.

In the master's thesis the object of research is the process of calcination of coke and anthracite in a rotary drum kiln. The subject of the study is a mathematical model of a rotating drum kiln. Also, the features of work of the technological apparatus as a control object for which a mathematical description for the synthesis of the control system of temperature was carried out was investigated.

A startup idea was devised to create recovery equipment at the plant for rational use of heat.

In accordance with the theme of the master's dissertation, 3 abstracts are printed, an article is printed and an application for a useful model.

The master's dissertation contains an explanatory note in the volume of 81 hundred-rivers. The explanatory note contains 21 drawings, 22 tables, 27 literary sources.

The results of the work can be used and implemented in the control systems for the production of graphite electrodes. Developed in Matlab's software package, the model and control system diagrams can be used in the "Special sections of the theory of automatic control" and "Adaptive and robotic systems".

**KEYWORDS:** COX, ANTRAZIT, SINGLE PICTURE BAR, CONTROL SYSTEM, ADAPTIVE REGULATOR, CONTROL BATHROOM, CONTROL OBJECTIVE, MATHEMATIC MODEL, LQR-REGULATOR, STARTUP.

ВСТУП.....	10
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОЖАРЮВАННЯ КОКСУ.....	12
1.1.Актуальність процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі та використання прожареного матеріалу.....	12
1.2.Технологія прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі.....	13
1.3. Аналіз технологічних об'єктів процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі.....	18
1.4. Керування якістю процесу.....	20
1.5. Постановка комплексу задач дослідження.....	21
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБЕРТОВОЇ БАРАБАННОЇ ПЕЧІ.....	23
2.1. Постановка задачі моделювання процесу прожарювання вуглецевого матеріалу.....	23
2.2 Моделювання турбулентності.....	24
2.3. Дослідження механізму та кінетики процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі.....	26
2.3.1. Дослідження температурних полів обертової барабанної печі.....	29
2.4. Спрощення математичної моделі процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі.....	31
3. СИНТЕЗ СИСТЕМИМИ КЕРУВАННЯ З $LQR$ -РЕГУЛЯТОРОМ ЗАСОБАМИ MATLAB.....	37
3.1. Обґрунтування необхідності використання системи керування.....	37
3.2. Обґрунтування вибору оптимального $LQR$ – регулятора.....	39
3.3. Обґрунтування необхідності використання адаптивної системи керування.....	42
3.4. Синтез системи керування з $LQR$ -регулятором.....	44
4. СИНТЕЗ СИСТЕМИМИ КЕРУВАННЯ З ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ ЗАСОБАМИ MATLAB.....	49
4.1. Обґрунтування вибору ПІ – регулятора.....	49
4.2. Синтез системи керування з ПІ-регулятором.....	50
5. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРОЖАРЮВАННЯ КОКСУ І АНТРАЦИТУ В ОБЕРТОВІЙ БАРАБАННІЙ ПЕЧІ.....	57



6. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ВИКОРИСТАННЯ ВЕБ-ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ КЕРУВАННІ ВИРОБНИЦТВОМ».....	60
6.1. Вступ до розробки стартап-проекту .....	60
6.2. Опис ідеї стартап-проекту .....	60
6.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту ..	62
6.4. Технологічний аудит ідеї проекту .....	63
6.5. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	65
6.6. Розроблення ринкової стратегії проекту .....	73
6.7. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	75
6.8. Висновки.....	76
ВИСНОВКИ.....	78
ЛІТЕРАТУРА .....	80

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТОК – технологічний об’єкт керування

АСР – автоматизована система регулювання

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор

*LQR*-регулятор – лінійно-квадратичний регулятор

$T$  – температура

$c$  – теплоємність

$\rho$  – вологість

$t$  - час

$u_i$  - компоненти швидкості

$p$  - тиск

$h_s$  - ентальпія

$\lambda$  – теплопровідність

## ВСТУП

В магістерській дисертації було проведено дослідження контуру керування температурного режиму в обертовій барабанній печі. На даному етапі виробництва графітованих електродів – це один з найголовніших контурів, так як якість прожарювання вуглецевого матеріалу залежить саме від температури в обертовій печі. Прожарений кокс та антрацит далі використовується, як основний матеріал для виготовлення електродів.

Актуальність теми дисертації було визначено для забезпечення якісної та точної системи керування виробництвом графітованих виробів, яке активно розвивається на території України і сьогодні.

Основною задачею магістерської дисертації є дослідження і створення різноманітних систем керування температурним режимом в обертовій барабанній печі. Всі створенні системи керування повинні підтримувати задану температуру в печі, що в свою чергу, повинно забезпечувати потрібну якість вихідного матеріалу та нормальне протікання процесу прожарювання.

Переглянувши схожі роботи було з'ясовано, що велику кількість систем керування, реалізовано на основі класичних підходів теорії управління. Тобто майже всі системи реалізовані за допомогою класичних регуляторів. Такі АСК не завжди можуть справитись з нестандартним протіканням процесу, а саме забезпечити необхідну якість керування, наприклад якщо присутнє запізнювання, збурення, інерційність, вміст вологості в матеріалі перевищує стандартний діапазон, неповної та неякісної інформації. Крім того, звичайний ПІ-регулятор потребує постійного переналаштування коефіцієнтів, які забезпечують правильність керування у разі зміни технологічного процесу. У випадку процесу прожарювання коксу та антрациту такі зміни налаштувань мають негативний вплив на весь хід технологічного процесу [2].

Тому необхідно провести аналіз на доцільне використання систем управління, які будуть справлятися з поставленими задачами без зайвих втручань. Саме дослідженні системи за допомогою використання отриманих математичних моделей, узагальнюючих властивостей, вбудованої нелінійності та адаптивності дають можливість вирішити проблеми, які було описано вище.

Відповідно до проаналізованої інформації, було створення систему керування з використанням лінійно-квадратичного регулятора та порівняння з класичною та адаптивною системою ПІ-регулятора (у якості класичної системи керування була обрана система з ПІ-регулятором).

# **1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОЖАРЮВАННЯ КОКСУ І АНТРАЦИТУ В ОБЕРТОВІЙ БАРАБАННІЙ ПЕЧІ**

## **1.1. Актуальність процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі та використання прожареного матеріалу.**

На сьогоднішній день виробництво вуглецево-графітової продукції досить актуальне.

Науковці та керівники, які працюють над підвищенням якості продукції та оптимізації виробництва розроблять нові методи керування процесом, застосовуючи нові інноваційні технології. Також постійно удосконалюються технологічні і виробничі процеси, ведеться робота з модернізації і розробки нових видів продукції.

Сьогодні вуглецево-графітова продукція широко використовується на металургійних підприємствах України, СНД, країнах ближнього і далекого зарубіжжя [1,3].

Графітові електроди виробляють з вуглецевих матеріалів на спеціальних електродних заводах в результаті цілого ряду технологічних операцій. Графіт, з якого складаються електроди промислового використання, називається штучним і відрізняється від звичного багатьом знайомому графіту в стрижнях олівців. Метод отримання штучного електродного графіту був винайдений більше 100 років тому і зветься по імені винахідника Ачесона - ачесоновський графіт. Ачесон - американський дослідник (1856-1931), який намагався отримати з поширених форм вуглецю (коксу, вугілля) алмаз, але в підсумку відкрив метод отримання штучного графіту, який використовується і понині[4].

Незважаючи на такий солідний вік методу і досить добре освоєну технологію отримання ачесоновського графіту, в даний час немає єдиної теорії, що пояснює власне фізику перетворення вихідних матеріалів в графіт. Не викликає сумнівів, що процес виробництва штучного графіту є надзвичайно «наукомістким».

Вся продукція виробляється на основі вуглецевої сировини - антрациту, кам'яного вугілля та ін., А також їх похідному - коксі. Ці матеріали, будучи відповідним чином обробленими, мають дуже важливу властивість - здатністю витримувати високі температури. Досить сказати, що графіт при відсутності доступу

повітря може витримувати температури до 3000 °С. Унікальне поєднання фізичних властивостей - висока електропровідність і термостійкість робить матеріали безальтернативними [4].

## **1.2. Технологія прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі**

У електродному виробництві для збільшення об'ємів прожарених вуглецевих матеріалів основними агрегатами є обертові барабанні печі. Такі печі використовуються в Україні на заводах «Укрграфіт» та «НовЕЗ» для отримання термоантрацитів.

Пічний агрегат з обертовою барабанною пічкою складається з установки обертової печі, установки холодильного барабана і комплектуючого обладнання.

Подрібнений вуглецевий матеріал по системі конвеєрів транспортують в пічний бункер. Кокс чи антрацит за допомогою зважувального дозатора потрапляє в обертову барабанну піч. Піч протivotочного типу: сировина через завантажувальний пристрій подають назустріч потоку відводящих газів, отриманих в результаті спалювання природнього газу і горючих компонентів летких речовин, які виділяються в процесі прожарювання. Природній газ подається в піч через газогорючий пристрій, який встановлений в торцевій стінці нижньої головки печі. Повітря на згорання подається вентиляторами двома потоками: один саме до пальника, другий через стінку печі в зону інтенсивного виділення летких речовин. Кокс прожарюють при 1200-1250, антрацит – при 1250-1300 °С [2].

Прожарений матеріал із печі потрапляє в обертовий барабанний холодильник з зовнішнім водяним охолодженням. Охолоджений кокс чи термоантрацит із холодильника потрапляє через ваги на стрічковий конвеєр і далі до елеватора. Елеватор подає прожарений матеріал в силос запасу, звідки по мірі необхідності стрічковим конвеєром його направляють в заготовлене відділення.

Відводящі із печі димові гази через пило-осадну камеру і газохід потрапляють в котел-утилізатор або по обвідному борову скидають в атмосферу димососом через батарею циклонів і димову трубу. Просипи з пило-збірника верхньої головки печі за

допомогою системи транспортування повертають на подачу в піч, а пил, осаджений в пило-збірнику, електрофільтрі та циклонах направляють на утилізацію [2].

Зазвичай барабанними печами, що обертаються називають агрегати безперервної дії з робочим простором у вигляді порожнього циліндра [5].

У конструктивному відношенні печі, що обертаються відрізняються, в основному, тільки розмірами і пристроєм систем завантаження і вивантаження матеріалів.

Металевий барабан, футерований вогнетривкою цеглою, встановлюють під невеликим кутом до горизонту на опорні ролики. Нерідко діаметр барабана роблять змінним по довжині. Барабан приводять в обертання електродвигуном через редуктор і відкриту зубчасту передачу. Шихту завантажують з боку головки. Суху шихту подають механічними живильниками, а шихту у вигляді пульпи - наливом або через форсунки [5].

Паливо (10 - 30% від маси шихти) вводять через горілки (форсунки), поміщені в гарячій голівці. Тут же вивантажують готовий продукт, що направляється в холодильник. Гази з трубчастої печі, що обертається очищають від пилу. Для поліпшення умов теплопередачі до печі вбудовують різні теплообмінні пристрої - полки, ланцюгові завіси, насадки і т.д. З цією ж метою в ряді випадків футеровку печей виконують складної форми. Основні розміри печі, що обертається варіюються в значних межах: довжина від 50 до 230м, а діаметр від 3 до 7,5 м. Продуктивність досягає 150 т / год (готового продукту). Спостерігається тенденція до з'єднання печі з різними теплообмінними апаратами, що дозволяє при підвищенні техніко-економічних показників роботи печей зменшувати їх розміри. Трубчаста піч, що обертається складається з наступних основних вузлів: циліндричного сталевго барабану, футерованого зсередини вогнетривкою цеглою, опорних пристроїв, приводу, головок - топкової (гарячої) і газовідвідної (холодної) і перевантажувального пристрою [5].

Барабан печі зварений із сталевих царг; з допомогою бандажів він спирається на опорні ролики. Число опор залежить від довжини барабана; при довжині барабана 40-45м воно не перевищує трьох. Бандажі виготовлені у вигляді кілець із спеціальної твердої литої сталі. Крайні бандажі, за рахунок температурних змін довжини

барабана, змінюють положення щодо опорних роликів, середній же знаходиться між контрольними роликами, що обмежують його переміщення в нейтральному перетині барабана. Венцова шестерня кріпиться до барабана плоскими сталевими пластинами, встановленими по дотичній до нього. Вона закрита сталевим кожухом, що оберігає її від потрапляння сторонніх предметів і бруду. Щоб похило розташований барабан печі не міг зміститися по роликам на величину, більшу встановленої, опорні ролики змонтовані так, що їх робоча циліндрична поверхня знаходиться під не великим кутом до робочої поверхні бандажа. Щоб уникнути сходу барабана з опорних роликів у разі поломки осі контрольного ролика, по обидві сторони верхнього бандажа встановлені нерухомі упори. Для підвищення поперечної жорсткості барабана між бандажами змонтовані кільця жорсткості з радіальними зазорами між корпусом і кільцем.

В даний час найбільшого поширення набули трубчасті печі, що обертаються з барабанними холодильниками. Технічна характеристика печі: довжина 45 м, діаметр 3,0 м, кут нахилу  $2,5^\circ$ , число оборотів в хвилину 1,5-2,0, продуктивність по прогартованому матеріалу 10-12 т / год, час перебування матеріалу в печі 60 -80 хв., питома витрата умовного палива 40-50 кг / т. Кокс по всій довжині барабана печі розподіляється рівним шаром; в поперечному перерізі він має форму сегмента. Рух матеріалу в печі відбувається за рахунок нахилу барабана в горизонтальній площині. Швидкість руху матеріалу і продуктивність печі прямо пропорційні її діаметра, числу обертів і куту нахилу. Нагрівання коксу здійснюється за принципом протитечії, тобто кокс і нагріті газу рухаються назустріч один одному [5].

Час перебування матеріалу в печі повинно бути достатнім для видалення вологи, летких і закінчення фізико-хімічних перетворень в прожарюваному коксі. Воно залежить від таких факторів, як діаметр і довжина печі, число обертів барабана, кут нахилу барабана і коефіцієнт тертя матеріалу про футеровку. Причому діаметр, довжина і кут нахилу, завжди постійні. Незначно в процесі експлуатації змінюються число обертів барабана і коефіцієнт тертя матеріалу. При сталості основних параметрів процесу прожарювання час перебування коксу в печі змінюється незначно [5].



Іншим фактором, що істотно впливає на продуктивність, є коефіцієнт заповнення печі. Коефіцієнтом заповнення називається відношення площі поперечного перерізу потоку матеріалу до всієї площі перетину барабана печі. Для печей з діаметром барабана 3,0 м коефіцієнт заповнення становить 6-8%. Змінюючи завантаження барабана коксом, можна продуктивність печі регулювати в широких межах. Однак в заводських умовах продуктивність печі прагнуть підтримувати постійною.

Нагрівання коксу здійснюється в основному променистою енергією палаючого факела, а також при безпосередньому контакті розпечених топкових газів з коксом (тобто конвекцією). Має місце також променистий теплообмін між матеріалом і розігрітій футерівкою печі. Значна кількість тепла виділяється за рахунок горіння летких і самого прожарюємо матеріалу [5].

Якість прожарювальної вуглецевої сировини залежить від температури матеріалу і терміну прожарювання. Загружений в піч антрацит проходить послідовно зону осушування та розігріву при температурі 1250...1350 °С теплом газового потоку і прямого контакту з нагрітою футеровкою (для прожарювання коксу температура 1200...1250 °С).

Всю обертову піч можна розділити на три зони зі своїми температурами, перша зона – сушка та розігрів (до 400 °С), друга зона – виділення летких речовин (від 400 до 800...1000 °С) та третя зона – ущільнення структури (від 800...1000 до 1250...1350 °С). Механізм теплообміну при прожарюванні вуглецевої сировини дуже складний. Він зв'язаний з процесами горіння палива – природнього газу, вуглецевої сировини і виділяючих з неї летких речовин.

При нагріві матеріалу в обертовій печі розрізняють теплообмін зовнішній і внутрішній. Зовнішній теплообмін, тобто передача тепла від газу-теплоносія і футеровки печі до поверхні шару гріючого матеріалу, здійснюється одночасно трьома способами: випромінюванням, конвекцією та безпосереднім контактом [1].

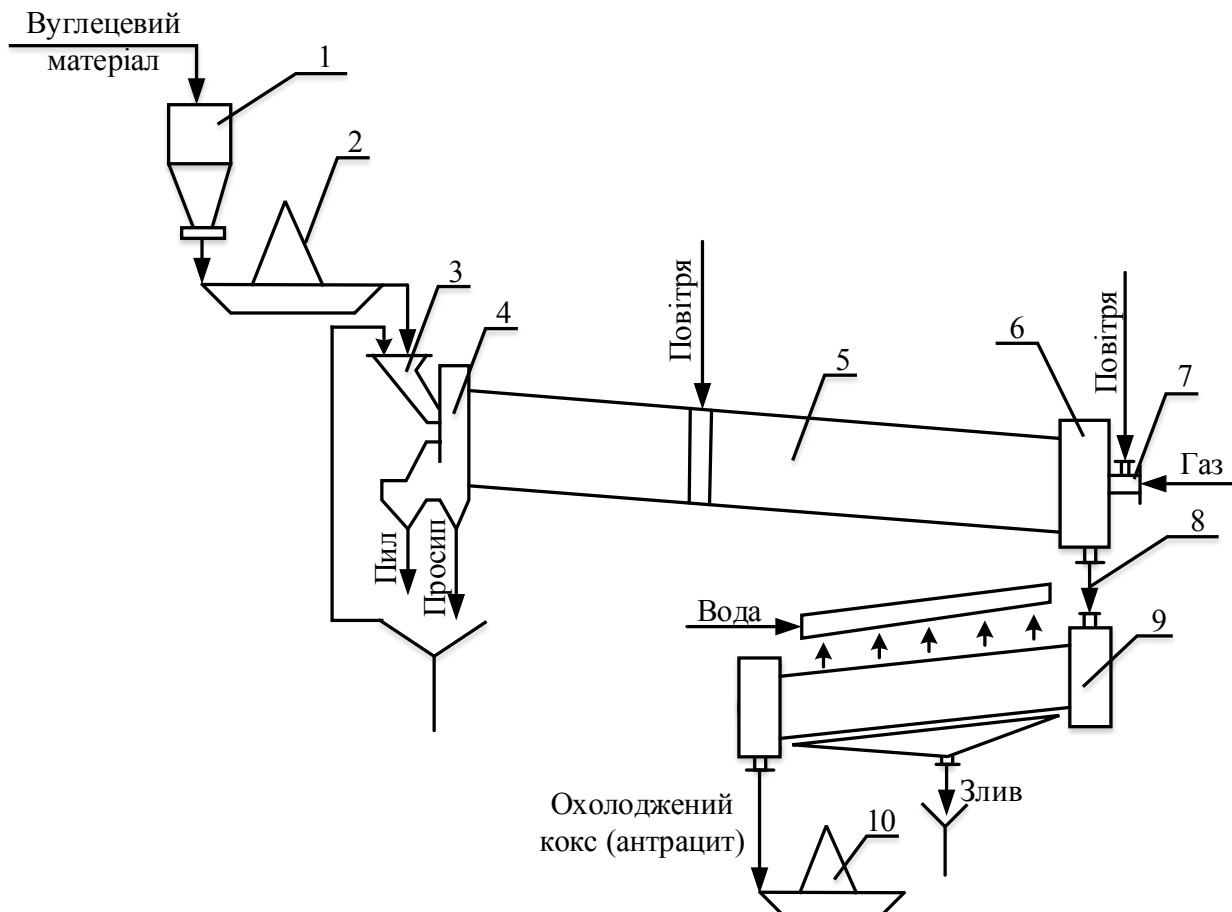


Рис.1.1. Технологічна схема прожарювання коксу та антрацисту

1 – пічний бункер; 2 – ваги-дозатори; 3 – завантажувальний пристрій; 4 – верхня головка печі; 5 – обертова барабанна піч; 6 – нижня головка печі; 7 – газо-пальниковий пристрій; 8 – завантажувальний пристрій; 9 – холодильник; 10 – контрольні ваги

Основні стадії прожарювання коксу та антрациту перераховано нижче:

- 1) сипучий вуглецевий матеріал подають в камеру через завантажувальний пристрій;
- 2) прожарювання вуглецевого матеріалу, який здійснюється за допомогою пальника;
- 3) сушка та розігрів;
- 4) виділення летких речовин;
- 5) ущільнення структури;
- 6) переміщення з завантажувального до розвантажувального пристрою, завдяки обертанню печі.

### **1.3. Аналіз технологічних об'єктів процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі**

Основними факторами, що впливають на процес прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі є: температура в барабанній печі, витрата газу, кількість та концентрація вуглецевого матеріалу, що подається на прожарювання.

Для забезпечення максимального прожарювання вуглецевого матеріалу необхідно підтримувати температуру в барабанній печі на рівні 1100...1300 °С, так як саме при цій температурі ступінь вилучення летких речовин найбільший. Для цього необхідні:

- підтримання визначеного співвідношення витрат газу та повітря;
- підтримувати задану температуру повітря на вході в барабанну піч.

Температура в барабанній печі знижується за рахунок великого поглинання тепла вуглецевого матеріалу, тому це необхідно враховувати при виборі співвідношення витрат газу та повітря, що подається на обігрів до пальника.

Також, для отримання якісної продукції необхідно слідкувати за концентрацією матеріалу, що подається до барабанної печі.

Для повноцінного прожарювання вуглецевого матеріалу, щоб отримати потрібну нам концентрацію і вилучити всі леткі речовини, необхідно інтенсивно перемішувати вуглецевий матеріал, тому кількість обертів печі не може бути меншою за певне мінімальне значення для отримання якісного продукту.

Не можна не згадати про важливість того, яка подається сировина до процесу, а саме, який усереднений розмір часток, адже в залежності від того, якого розміру частки подаються необхідно змінювати витрату газу та повітря і якщо частки будуть занадто великі, то вони не встигнуть повністю прожаритись і як результат залишаться небажані речовини в складі. Нерівномірна подача вуглецевого матеріалу може спричинити перенавантаження вагів і забиття пічного бункеру, що в свою чергу погіршить продуктивність. Основним критерієм якісного ведення процесу прожарювання коксу є максимальна продуктивність печі з мінімальним вигаром коксу при заданій якості готового продукту (певні щільність і електричний опір) [6].

На хід прожарювання коксу впливає велика кількість неконтрольованих збурень, таких як зміна крупності і вологості коксу, що загружається, теплота згоряння палива, що спалюється, складу шихти і т.д.

Відсутність датчиків автоматичного контролю вхідних параметрів процесу, до яких належить ступінь чаду коксу  $\beta_k$  до, щільність рк, питомий електричний опір  $R_e$ , не дозволяє створити систему регулювання процесу за кінцевими його показниками. Завдання управління в цьому випадку може бути зведена до підтримки режимних параметрів на рівні, що забезпечує з певною ймовірністю задані якісні показники процесу.

Основними режимними параметрами, що характеризують протікання процесу, є температури по зонах печі. Для технологічного процесу важливо забезпечити сталість розподілу температури в робочому просторі печі [7].

Підтримувати заданий температурний режим, який можна вважати постійним при стабільній за складом шихті (суміші різних коксів), можливо змінюючи кількість спалюваного в форсунці газу, кількість повітря, що вдувається, тяговий режим і величину завантаження коксу в піч. Частина повітря, що подається в піч, витрачається на спалювання газу, а інша частина-для допалювання летючих газів. Однак, надлишок повітря в печі призводить до спалювання коксу, тобто до збільшення його вигару [8].

Вивчення досвіду роботи печі при ручному управлінні вказує на низьку якість підтримки заданого режиму.

Внаслідок відмінності коксу по гранулометричному складу і коливань його вологості, завантаження коксу в піч здійснюється вкрай нерівномірно і коливається мимовільно від 3-4 т / год до 9-10 т / год. Така нерівномірність у подачі матеріалів несприятливо позначається на протіканні процесу. Збільшення кількості матеріалу, що завантажується, за інших рівних умов, призводить до зменшення довжини зони прожарювання і зсуву її до нижньої голівки печі.

Істотні коливання і тягового режиму, які часом позначаються на розподілі температури по довжині печі. При збільшенні розрідження зона прожарювання зміщується до верхньої голівки печі і загальна довжина її збільшується, що сприяє отриманню високоякісних прогартованих коксів при підвищеній продуктивності.

Однак, при збільшенні розрідження значно збільшується винесення дрібних частинок коксу, і, крім цього, знижується ефективність використання летючих. Доцільним можна вважати стабілізацію розрідження на рівні, що забезпечує максимальну продуктивність при допустимій величині виносу пилу. Загалом коливання тягового режиму досягають 30% від номінального.

Коливання цих величин призводять до неприпустимих за величиною відхилень температурного режиму печі і є причиною погіршення якості прогартованого матеріалу, а іноді навіть призводять до браку. Тривалість сушки і розігрівання футеровки печі залежить, насамперед, від виду ремонту футерування і температури зовнішнього повітря (якщо піч знаходиться поза приміщення). При місцевому ремонті, а також при кладці цегли насухо в теплу пору року тривалість нагрівання до робочої температури може становити всього 12-18 год. При ремонті футеровки на розчині в холодну пору року тривалість сушіння й нагрівання футеровки збільшується до 48-54 год [8].

Швидкість підйому температури нагріву футеровки печі в будь-якому разі не повинна перевищувати 100 °С/год. Щоб уникнути прогину барабана і для забезпечення рівномірного прогріву всієї кладки піч повертають через кожні 2 год на 1/3 оберту. У міру підйому температури піч переводять на малі обороти, а при прогріванні футеровки в зоні прожарювання до робочої температури - на основний привід, після чого включають живильник коксу. Протягом 3-4 год після початку подачі коксу температурний і газовий режим доводять до робочого стану [8].

Таким чином, для стабілізації розподілу температури по довжині печі, необхідно: стабілізувати витрату газу, стабілізувати співвідношення витрат газ-повітря, стабілізувати розрідження, стабілізувати завантаження коксу, вводити корекцію на витрату газу при відхиленні температури в нижній головці, вводити корекцію на завантаження коксу при відхиленні температури вихідних газів.

#### **1.4. Керування якістю процесу**

Для отримання високоякісного вихідного продукту у процесі прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі було розроблено систему керування температурним режимом, в якій було враховано особливість перебігу даного процесу. Під час розробки увага приділялась економічній доцільності застосування

того чи іншого засобу автоматизації, щоб виробництво не стало збитковим внаслідок таких змін.

Для процесу прожарювання коксу та антрациту було обрано засоби автоматизації, які дозволяють управляти процесом максимально ефективно, надійно та якісно. Усі речовини, необхідні для нормального перебігу процесу та якісного вихідного продукту повинні подаватися у певному співвідношенні, що забезпечується вимірюванням і регулюванням витрати певних компонентів.

Подрібнений вуглецевий матеріал по системі конвеєрів повинен спочатку подаватись в пічний бункер. Далі кокс чи антрацит за допомогою зважувального дозатора потрапляє в обертову барабанну піч. На виробництві графітованих електродів для прожарювання вуглецевого матеріалу використовують піч протivotочного типу: сировину через завантажувальний пристрій подають назустріч потоку відводяться газів, отриманих в результаті спалювання природного газу і горючих компонентів летких речовин, які виділяються в процесі прожарювання. Природний газ подається в піч через газо-горючий пристрій, який встановлений в торцевій стінці нижньої головки печі. Повітря на згорання подається вентиляторами двома потоками: один саме до пальника, другий через стінку печі в зону інтенсивного виділення летких речовин. Тому для прожарювання вуглецевого матеріалу необхідно підтримувати температуру в печі не нижче ніж 1250 °C і забезпечити співвідношення подачі газу та повітря [2].

### **1.5. Постановка комплексу задач дослідження**

Процес прожарювання вуглецевого матеріалу необхідно автоматизувати на високому рівні, тобто необхідно розробити і дослідити системи керування температурним режимом в обертовій барабанній печі. Перед цим необхідно ознайомитись з технологічним процесом, визначити параметри виробництва, які забезпечать нормальне протікання процесу, параметри, які необхідно контролювати та за якими треба спостерігати, щоб забезпечити максимальну якість вихідного продукту. Системи керування зобов'язані підтримувати задану температуру в печі, що забезпечуватиме необхідну якість продукції на виході з печі та нормальну роботу процесу. Буде проведено аналіз об'єкта керування, розроблено для нього

математичну модель та побудовано не одну систему керування системи керування, в результаті чого буде порівняно дані системи керування. Також необхідно мінімізувати витрату газу, що подається на підігрів печі та вивести потрібне значення температури на заданий рівень. Для розв'язання цієї задачі було обрано систему керування з  $LQR$ -регулятором в якому застосовується квадратичний критерій якості.

## **2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБЕРТОВОЇ БАРАБАННОЇ ПЕЧІ**

### **2.1. Постановка задачі моделювання процесу прожарювання вуглецевого матеріалу**

Обертova барабанна піч для прожарювання коксу та антрациту – це піч, яка на перший погляд має просту будову і форму, але насправді – це зовсім не так. Основними компонентами обертovoї печі є обичайка, вогнетривка футеровка, підтримувальні бандажі та ролики, тяговий триб, пальник, камери для подачі повітря та внутрішні теплообмінники.

У просторі обертovих печей здійснюються газодинамічні і тепло-масообмінні процеси горіння, турбулентного змішування палива, повітря і газоподібних продуктів згоряння, тепловиділень і радіаційно-конвективного теплообміну між газоподібною середовищем, футеровкою і технологічним матеріалом. Сукупність таких процесів, що розглядаються в усій їх складності та взаємодії, називають теплової роботою печі.

Відомо, що інтенсивність теплообміну, а, отже, і продуктивність промислової печі, витрата і повнота згоряння палива і в багатьох випадках якість продукції залежать від комплексу взаємопов'язаних факторів, таких як довжина, форма і температура факела, його положення щодо технологічного матеріалу, швидкість подачі палива і повітря, наявність рециркуляційних або застійних зон. У місцях підвищеного тепловиділення, внаслідок різкого зростання температури, може знижуватися стійкість футеровки або відбуватися утворення екологічно шкідливих компонентів типу оксидів азоту. Таким чином, вдосконалення теплової роботи промислових печей є однією з найважливіших сучасних інженерних задач [1].

Дослідження високотемпературних тепло-технологічних процесів можливо методами математичного моделювання, які передбачають чисельне рішення системи диференціальних рівнянь перенесення речовини, кількості руху і енергії. Математична модель, як правило, не вимагає при вирішенні інженерного завдання будь-яких емпіричних залежностей, крім рівнянь, що визначають фізичні властивості речовин.

Фізичну модель обертovoї барабанної печі прожарювання вуглецевого матеріалу можна сформулювати наступним чином. На основному етапі в печі



відбувається дифузійне турбулентне горіння природного газу. Згорання газу рахується повним, тобто з утворенням діоксида карбону та водяної пари. Відводячі із печі димові гази через пило-осадну камеру і газохід потрапляють в котел-утилізатор або по обвідному борову скидають в атмосферу димососом через батарею циклонів і димову трубу. Просипи з пило-збірника верхньої головки печі за допомогою системи транспортування повертають на подачу в піч, а пил, осаджений в пило-збірнику, електрофільтрі та циклонах направляють на утилізацію. Режим руху газів в каналах печі є турбулентним, а теплообмін вважається складним [9].

Математична модель барабанної печі базується на основі усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (RANS). При розробці математичної моделі доцільно розглядати всі стадії – від нагріву до прожарювання матеріалу.

## **2.2 Моделювання турбулентності**

Нестационарні рівняння динаміки в'язкої рідини описують рух в турбулентній течії аж до мінімальних масштабів турбулентності. Однак при чисельному рішенні цих рівнянь для того, щоб врахувати ці масштаби, може знадобитися настільки дрібна сітка, що навіть сучасні комп'ютерні потужності не дозволять вирішити таке завдання. Те ж відноситься і до вибору кроку чисельного інтегрування за часом, так як характерний час дрібномасштабної турбулентності дуже малий. З іншого боку, саме дрібномасштабні турбулентності грають найважливішу роль при описі турбулентних течій [10].

Тому пряме чисельне моделювання (Direct Numeric Simulation, DNS) турбулентних течій застосовується для інженерних розрахунків досить рідко.

В даний час найбільш поширеним способом моделювання турбулентності є використання осереднення Рейнольдса (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS), коли замість рівнянь для миттєвих значень параметрів використовуються рівняння для деяких усереднених величин. Ці рівняння називаються рівняннями Рейнольдса. Відповідно до сформульованої фізичної моделі багатоканальної печі математична модель нестационарного дифузійного горіння природного газу в турбулентному потоці може бути побудована на основі усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-

Стокса (RANS). Ця процедура вводить незакриті величин які повинні бути змодельовані з використанням моделей турбулентності горіння [10].

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0; \\ \frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_j} &= \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}; \\ \frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_k) &= -\frac{\partial}{\partial x_i}(V_{k,i} Y_k) + \dot{\omega}_k, k = \overline{1, N}; \\ \frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h_s) &= \dot{\omega}_T + \frac{D_p}{D_t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k}) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i},\end{aligned}$$

де  $\rho$  - щільність;  $t$  - час;  $u_i$  - компоненти швидкості;  $p$  - тиск;  $\tau_{ij}$  - тензор напружень;  $Y_k$  - масова частка компоненти хімічної реакції горіння;  $V_{k,i}$  - дифузна швидкість  $k$ -го компонента;  $w_k$  - швидкість реакції  $k$ -го компонента;  $h_s$  - ентальпія;  $\dot{\omega}_T$  - об'ємне джерело теплоти за рахунок горіння;  $D_p/D_t$  - субстанціональна похідна від тиску;  $D_t$  - коефіцієнт турбулентної дифузії;  $\lambda$  - теплопровідність;  $T$  - температура.

В результаті усереднення наведених вище рівнянь отримуємо [10]

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i) &= 0; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j); \\ \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{Y}_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) &= -\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{V}_{k,i} \tilde{Y}_k - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) + \bar{\dot{\omega}}_k, k = \overline{1, N}; \\ \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{h}_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_s) &= \bar{\dot{\omega}}_T + \frac{\bar{D}_p}{\bar{D}_t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\lambda} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k});\end{aligned}$$

Як вже було сказано для системи рівнянь Рейнольдса, що описують усереднений потік рідини при турбулентному режимі з'являються додаткові невідомі параметри, що мають фізичний смисл тензора турбулентних напруг тертя.

Для замикання системи необхідно отримати формулу турбулентної в'язкості. В наш час для вирішення цієї задачі частіше всього використовуються двопараметричні моделі. Однією з таких моделей є  $k$ -е модель.

З точки зору теорії розмінностей можна припустити що відношення  $k/\varepsilon$  і є той час за який енергія руху великих вихрів, отримана від усередненого руху, проходить весь спектр масштабів розмірів: від найбільш великих до самих малих при яких відбувається дисипація турбулентної енергії [10].

При такому підході турбулентна в'язкість визначається як

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

де турбулентна кінетична енергія  $k$  і швидкість її дисипації  $\varepsilon$  описуються за допомогою двох рівнянь балансу:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \bar{\rho}\varepsilon; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}\tilde{u}_i \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned}$$

Константи в  $k$ -е моделі турбулентності зазвичай приймають:

$$C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.44$$

Ця модель користується великою популярністю завдяки своїй простоті і економічній ефективності [10].

### 2.3. Дослідження механізму та кінетики процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі

Процес прожарювання коксу та антрациту є однією з важливих стадій на виробництві вуглеграфітової продукції. Саме на цій початковій стадії з вуглецевого матеріалу шляхом прожарювання в обертовій барабанній печі позбавляються всіх небажаних компонентів, таких як: леткі речовини, вологість матеріалу та інші. Час перебування матеріалу в печі повинно бути достатнім для видалення вологи, летких і закінчення фізико-хімічних перетворень в прожарювальному коксі. Процес прожарювання коксу та антрациту проходить поступово, так як барабанна піч поділяється на три основні зони зі своїми температурами, перша зона – сушка та розігрів (до 400 °C), друга зона – виділення летких речовин (від 400 до 800...1000 °C) та третя зона – ущільнення структури (від 1000 до 1350 °C) [2].

Досягнення необхідних температур відбувається за рахунок згорання природного газу та повітря. Температура в печі напряму залежить від витрати природного газу, тобто чим вища температура печі, тим більша витрата газу.

Для всіх подальших розрахунків прийнято наведені в табл. 1 - 3 фізичні властивості матеріалів печі:

*Таблиця. 2.3.1. Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту*

$T, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$
273	1900	675	0,84
323	1900	797	-
373	1900	877	-
423	1900	933	-
473	1900	975	-
523	1900	1008	0,99
773	1900	1111	1,14
1023	1900	1176	1,29
1273	1900	1230	1,44
1523	1900	1279	1,59

*Таблиця. 2.3.2. Теплофізичні властивості матеріалу*

$T, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$
273	1635	690	8
400	1635	893	-
500	1635	1160	8,3
600	1635	1315	-
700	1635	1423	-
800	1635	1501	8,5
900	1635	1566	-
1000	1635	1620	8,8
1100	1635	1669	-
1200	1635	1710	9,3
1400	1635	1790	-

Таблиця. 2.3.3. Теплофізичні властивості повітря

$T, K$	$c_p, Дж/(кг \cdot K)$	$\lambda, Вт/(м \cdot K)$
273	1005	0,0244
373	1009	0,0321
473	1026	0,0393
573	1047	0,046
673	1068	0,0521
773	1093	0,0574
873	1114	0,0622
973	1135	0,0671
1073	1156	0,0718
1173	1172	0,0763
1273	1185	0,0807
1373	1197	0,085
1473	1210	0,0915

Для проведення розрахунків було реалізовано геометрію обертової печі діаметром 3,05м та довжиною 40 м, що наведена на рис.2.3.1.

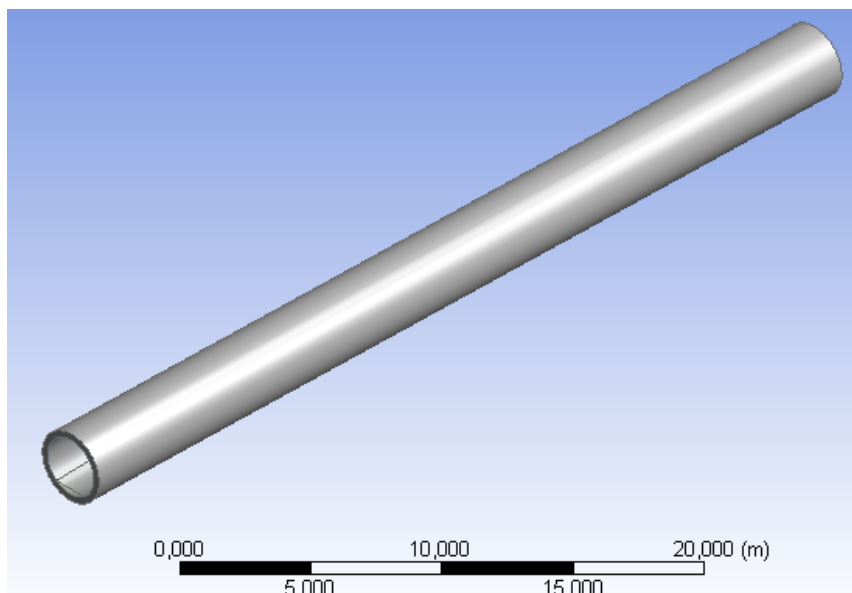


Рис.2.3. – Геометрія обертової барабанної печі

Прийнято, що час моделювання 35 год, швидкість обертання 5 рад/с, максимальна температура факелу 1273 K та початкова температура матеріалу 300 K.

### 2.3.1. Дослідження температурних полів обертової барабанної печі

Так як процес прожарювання вуглецевого матеріалу проходить не при постійній температурі, то необхідно провести дослідження при яких температурах доцільно і раціонально проводити прожарювання коксу та антрациту для отримання якіснішого вихідного матеріалу та оптимізації палива.

Дослідження проводиться над обертовою барабанною піччю в яку подається вуглецевий матеріал розміром до 120 мм. Тривалість прожарювання до 35 годин при максимальній температурі факелу 1473 К. Початкова температура матеріалу прийнята за 300 К. Температури приймаються 1273 та 1473 К.

**Дослідження.** Основна ідея дослідження зміни температурних полів полягає в тому, щоб дослідити однорідність температури по всій довжині печі. Нам необхідно, щоб матеріал який подається в піч прожарювався повністю, тобто мав однорідну структуру після перебування в печі.

Результатами дослідження є температурні поля обертової барабанної печі з температурами факелу 1273 та 1473 К, які наведені на рис 2.3.1. З результату дослідження видно, що температура матеріалу зростає до певної межі, а далі стабілізується в діапазоні 835...865 К для першого та 935...970 К для другого випадку відповідно [11, 12].

Найвищими є температури біля пальника 1240 К та 1430 К, мінімальними є температури з протилежного боку печі близько 130 К та 93 К відповідно.

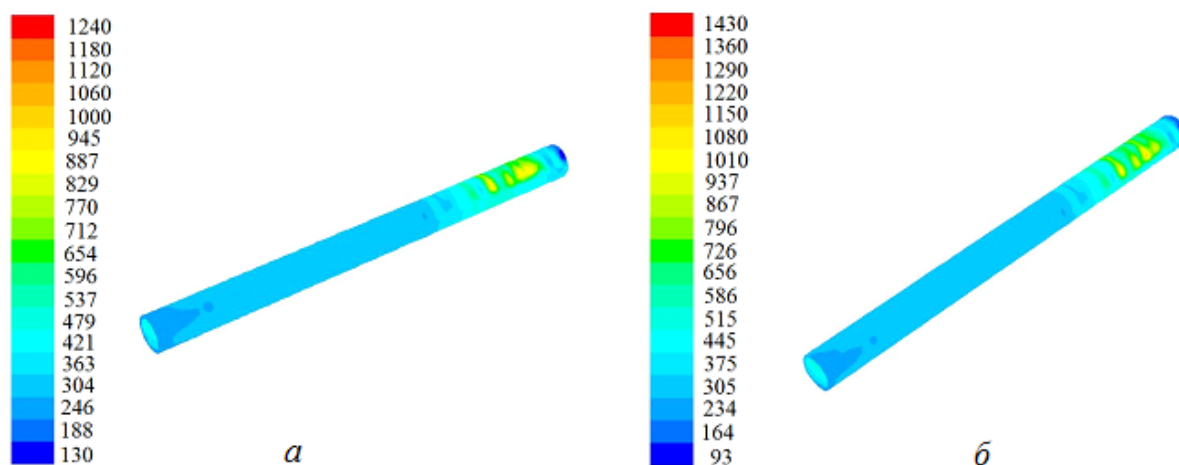


Рис 2.3.1. Загальний вид температурних полів обертової печі

Після проведених досліджень можна сказати, що при зменшенні витрати палива температура і перепад по температурі матеріалу зменшується, а при збільшенні

витрати газу, температура матеріалу і перепад по температурі зростає, що для нашого випадку є недоцільним [11]. На рис.2.3.2 зображено графіки середніх температур матеріалу, по яких проводилось дослідження. Саме по них було визначено перепад температури і для порівняння було побудовані гістограми, які зображені на рис.2.3.3.

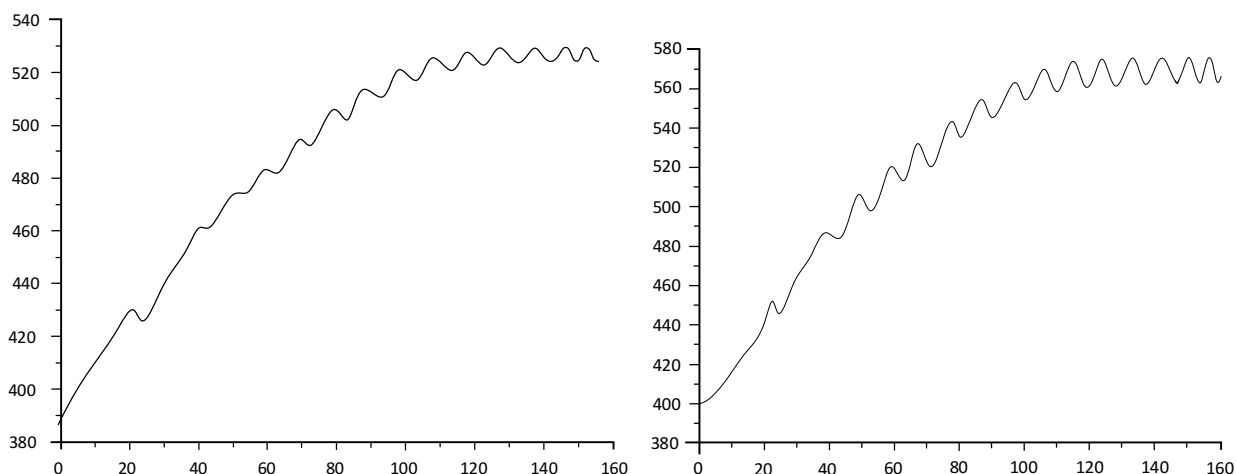


Рис. 2.3.2. Графіки по перепаду температури матеріалу на виході з печі при температурних режимах 1273 К та 1473 К відповідно

Так як отримані графіки коливаються було розраховано температурні перепади по матеріалу при 1273 К та 1473 К відповідно. При температурі в печі 1273 К перепад дорівнює приблизно 7 К, а при 1473 К приблизно 16 К, тобто перепад збільшився більше ніж у 2 рази.

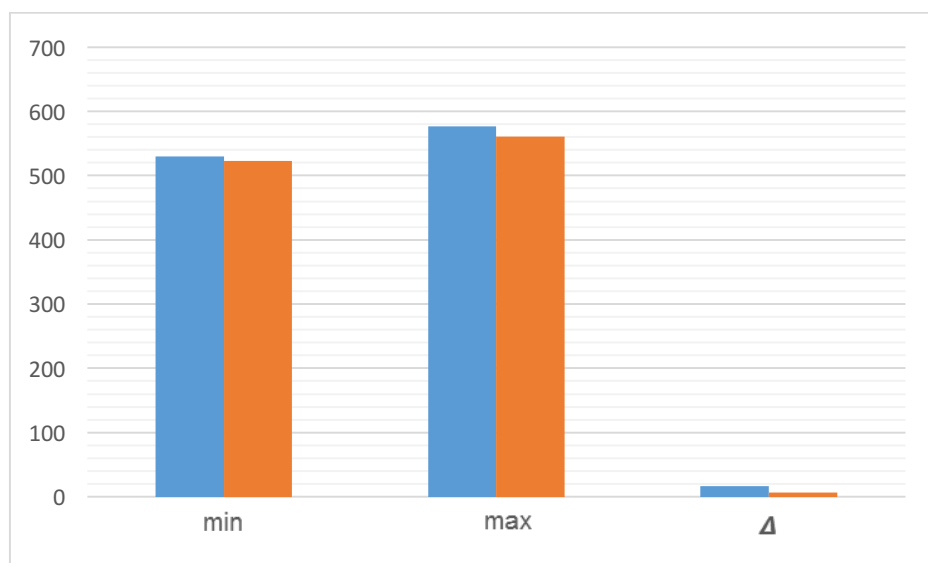


Рис. 2.3.3. Гістограма по перепаду температури матеріалу на виході з печі при температурних режимах 1273 К та 1473 К відповідно

Для більш повного дослідження температурних полів було побудовано графіки температури матеріалу на виході з печі, які представлено на рис. 2.3.2. Так як

барабанна піч постійно обертається і отримані графіки виходячи на усталений рівень все рівно коливаються було прийнято рішення отримані графіки температури подати у вигляді точкової лінії і звичайною лінією було апроксимовано графік для візуального спрощення.

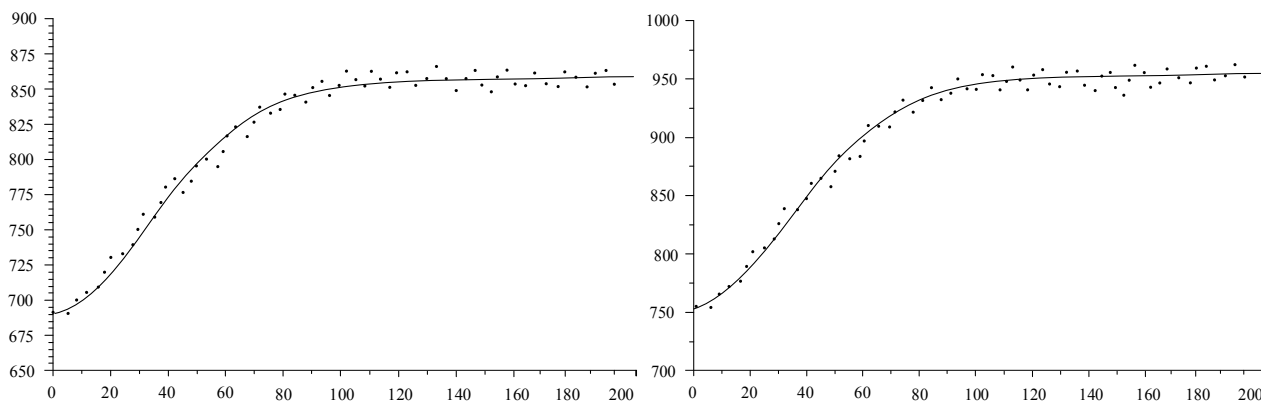


Рис 2.3.2. Графіки температури матеріалу на виході з печі при температурних режимах 1273 К та 1473 К відповідно

#### **2.4. Спрощення математичної моделі процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі**

При побудові математичних моделей нерідко виникають випадки, коли деякі вхідні величини не визначені і знайти їх чисельні значення не можливо. Існує кілька підходів для розкриття невизначеностей.

Широко використовується імовірнісний підхід, в якому невизначені параметри характеризуються функціями щільності розподілу. Математичні моделі, до складу яких входять такі параметри, мають назви імовірнісних. У цьому випадку функції розподілу будуються на підставі накопичених статистичних даних про поведінку стохастичних параметрів. Труднощі застосовуваної методики пов'язана з необхідністю проведення великого числа експериментів на об'єкті під час ходу технологічного процесу для визначення параметрів законів розподілу стохастичних величин.

Спрощення моделі полягає у апроксимації ANSYS-моделі простішими моделями, використовуючи залежності між температурами в різних точках. Метою цього є знаходження спрощеної моделі, що може передбачувати/оцінювати температури з малою похибкою по відношенню до ANSYS-моделі.

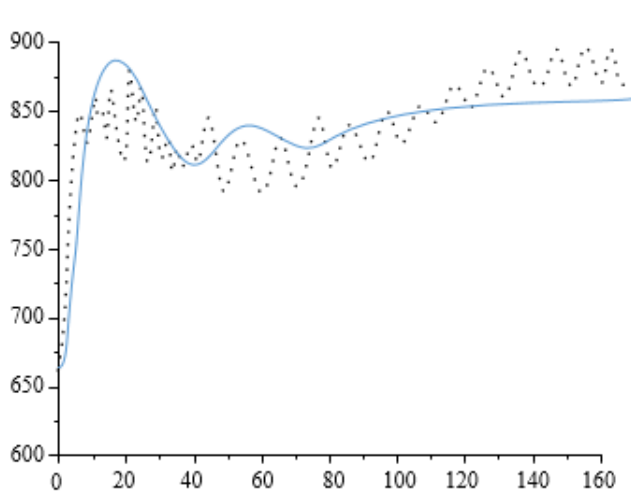


Для спрощення моделі процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі було обрано метод апроксимації. Даний метод дає наближене вираження одних математичних об'єктів іншими, близькими за значенням, але простішими та дає можливість визначити передавальні функції.

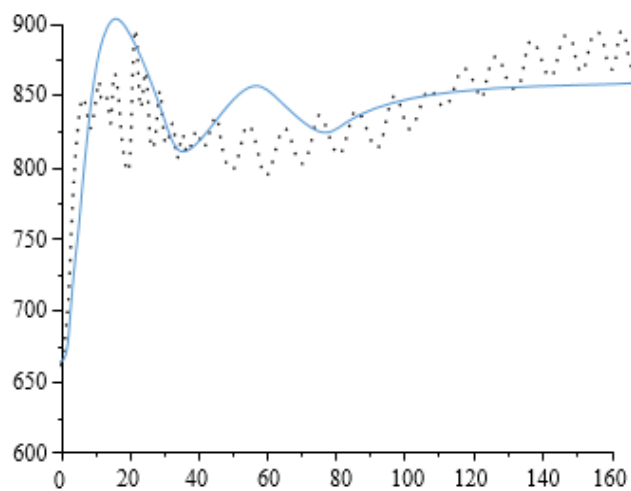
Завдяки отриманим експериментальним даним з середовища ANSYS, шляхом апроксимації було відтворено перехідні характеристики та передавальні функції, які описані і зображені нижче.

Так як вуглецевий матеріал необхідно прожарювати для видалення вологості та летких речовин було досліджено і отримано передавальні функції, коефіцієнти яких функціонально залежать від вологості. Вміст вологості у вхідному матеріалі, який ми розглядаємо 0, 5 та 10 % відповідно.

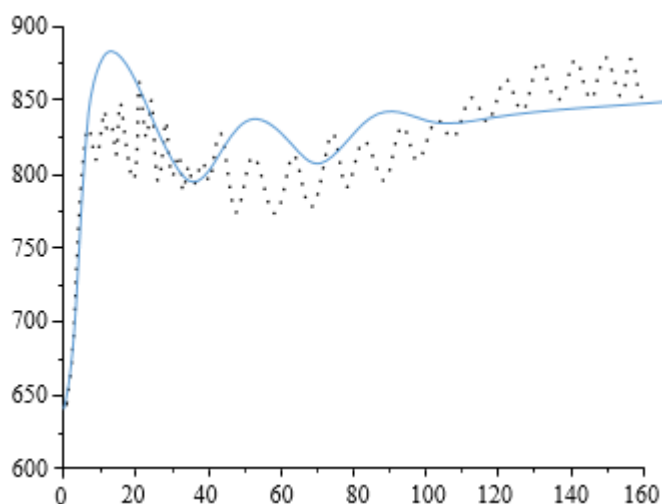
В середовищі *Matlab* шляхом апроксимації отриманих графіків температури матеріалу на виході (зображені на рис. 2.3.4) було отримано передавальні функції для матеріалу з вмістом вологості 0, 5 та 10 % та побудовано їх перехідні характеристики [11].



$\varphi = 0 \%$



$\varphi = 5 \%$



$$\varphi = 10 \%$$

Рис 2.3.4. Апроксимація експериментальних даних

Передатна функція, коефіцієнти якої функціонально залежать від вологості, можемо подати у такому загальному вигляді:

$$W_{\text{sum}} = \frac{k}{a_1(\varphi)p^3 + a_2(\varphi)p^2 + a_3(\varphi)p + 1},$$

де  $a_1$  та  $a_2$  – коефіцієнти, які функціонально залежать від вологості;  $\varphi$  – вологість;

Передатна функція по вмісту вологості 0 % (номінальна) має вигляд:

$$W_0(p) = \frac{k}{a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + 1} = \frac{1,58}{56,7p^3 + 47,7p^2 + 4,9p + 1};$$

Перехідна характеристика побудована в програмному пакеті *MatLab* і зображена на рисунку 2.3.5:

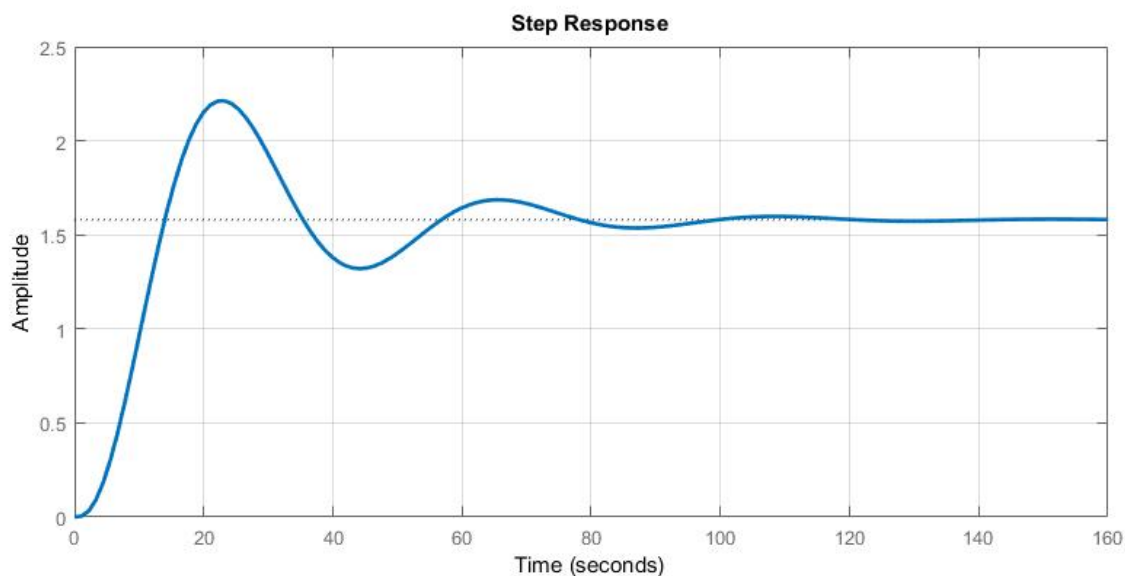


Рис. 2.3.5. – Перехідна характеристика по вмісту вологості 0 %

Передатна функція по вмісту вологості 5 % має вигляд:

$$W_5(p) = \frac{k}{a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + 1} = \frac{1,58}{59,2p^3 + 56,7p^2 + 5,9p + 1} ;$$

Перехідна характеристика побудована в програмному пакеті *MatLab* і зображена на рисунку 2.3.5:

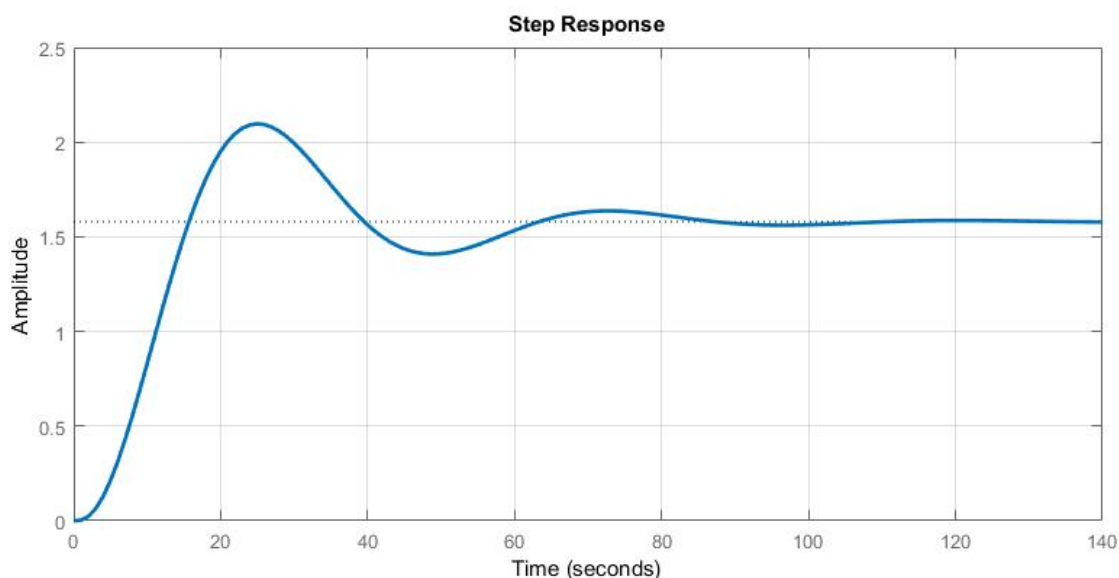


Рис. 2.3.6. – Перехідна характеристика по вмісту вологості 5 %

Передатна функція по вмісту вологості 10 % має вигляд:

$$W_{10}(p) = \frac{k}{a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + 1} = \frac{1,58}{52,2p^3 + 46,7p^2 + 4,5p + 1} ;$$

Перехідна характеристика побудована в програмному пакеті *MatLab* і зображена на рисунку 2.3.6:

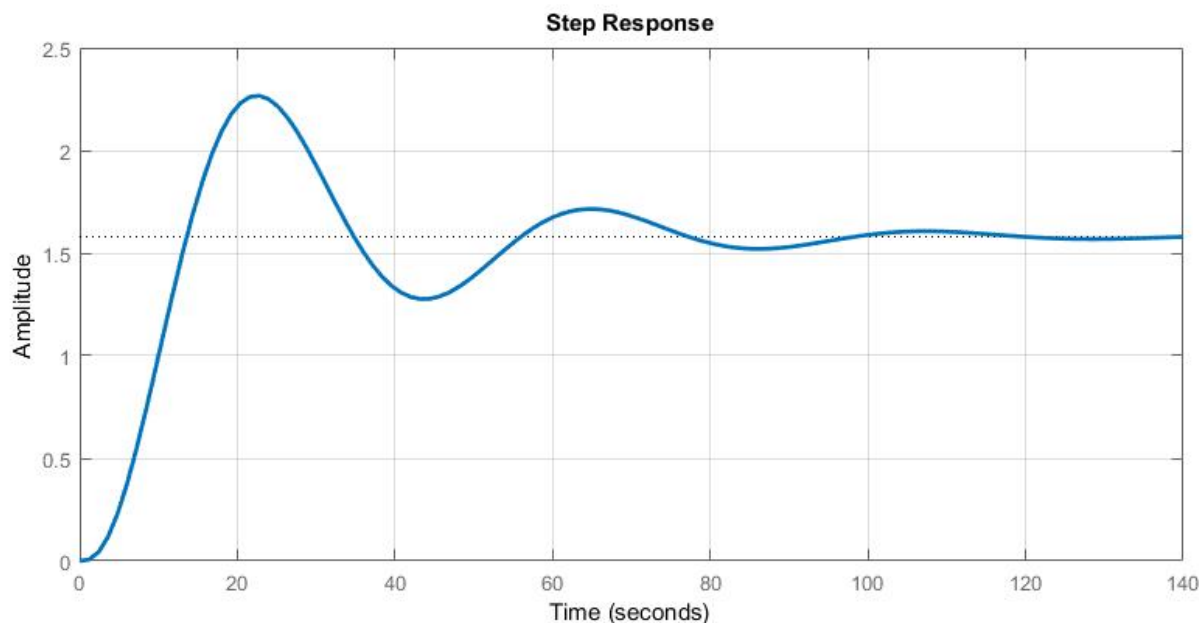


Рис. 2.3.6. – Перехідна характеристика по вмісту вологості 10 %

Для порівняльного аналізу перехідні характеристики для всіх трьох вологостей було побудовано на одному графіку рис. 2.3.7:

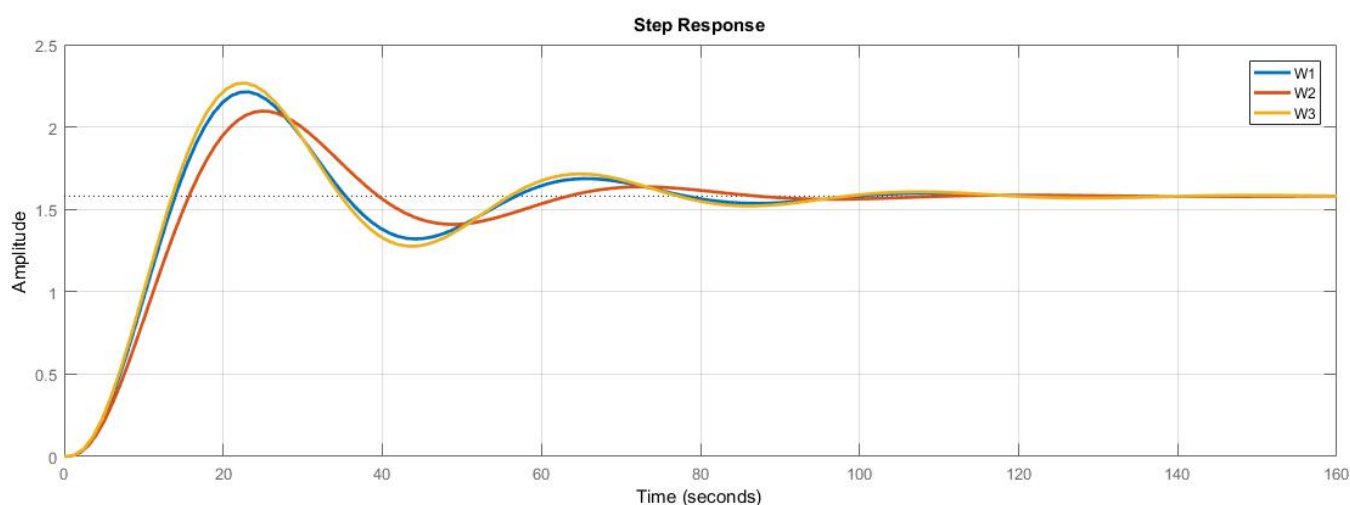


Рис. 2.3.7. – Перехідні характеристики

Для визначення залежності коефіцієнтів передатних функцій від вологості було побудовано точки (відповідні коефіцієнти передатних функцій по вхідному матеріалу з вмістом вологості 0, 5 та 10 %) та визначено залежність зміни коефіцієнтів у вигляді лінійних функцій [11]. Тому можемо стверджувати, що отримані результати цілком задовольняють спрощеній моделі барабанній печі. Визначені залежності зображені на рис. 2.3.8.

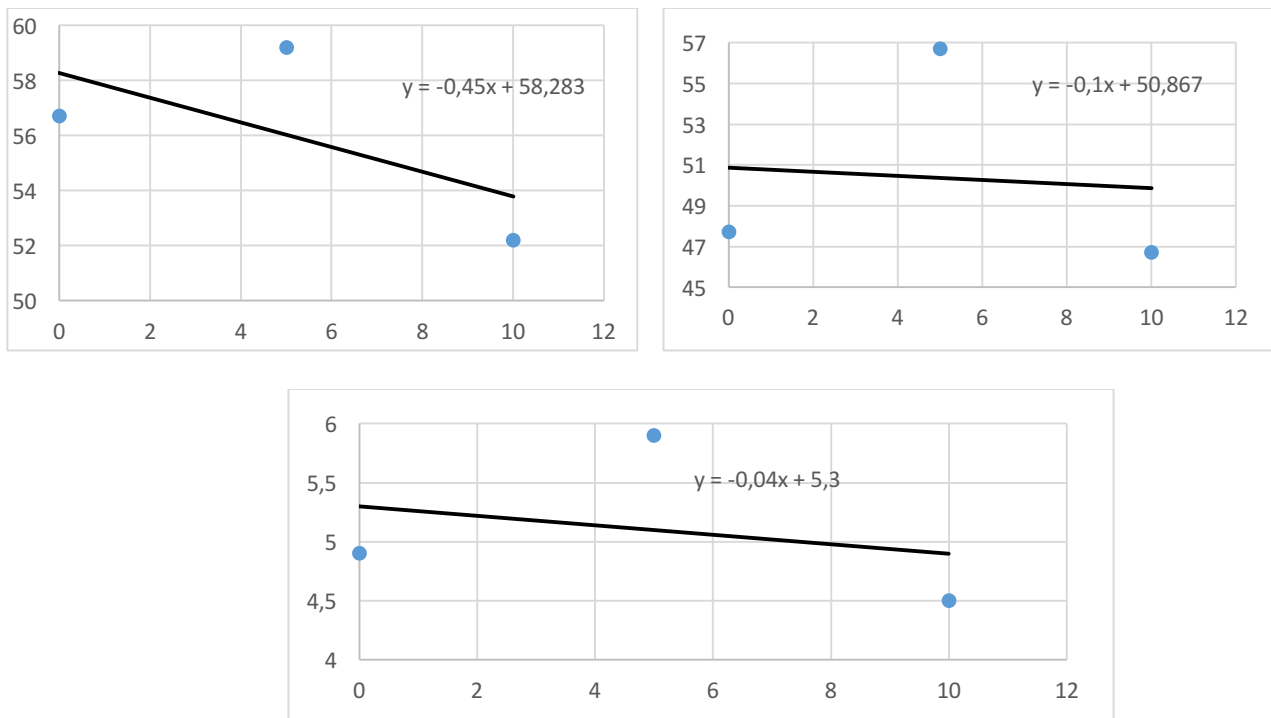


Рис. 2.3.8. – Функції залежності коефіцієнтів передавальних функцій від вологості

Після проведення всіх вище поданих досліджень по математичному моделюванню обертової барабанної печі, а саме: дослідження механізму та кінетики процесу прожарювання коксу та антрациту, дослідження температурних полів (завдяки яким ми змогли дослідити однорідність температурного режиму по всій довжині печі), визначення залежності коефіцієнтів передатних функцій від вологості було отримано спрощену модель обертової барабанної печі, яка відповідає основній. На основі отриманої спрощеної моделі можна синтезувати систему керування, яка буде адаптивною для матеріалу зі змінним вмістом вологості.

### **3. СИНТЕЗ СИСТЕМИМИ КЕРУВАННЯ З LQR-РЕГУЛЯТОРОМ ЗАСОБАМИ MATLAB**

#### **3.1. Обґрунтування необхідності використання системи керування**

Система керування це сукупність технічних засобів, необхідних для оперативного керування роботою електростанції (підстанцій), тобто для ведення технологічного процесу з заданими техніко-економічними показниками. Система керування містить в собі п'ять основних груп пристроїв (підсистем): регулювання, керування виконуючими органами, сигналізації, вимірювання та захисту. Підсистеми вимірювання та сигналізації забезпечують необхідну інформацію про роботу обладнання та протікання технологічного процесу, а за допомогою підсистем регулювання та керування здійснюється активний вплив, тобто керування об'єктом. При різких відхиленнях від заданого нормального режиму або при пошкодженні обладнання діє захист і здійснює автоматичне відключення відповідних елементів.

Для зручності оперативного обслуговування організовують пости керування, на яких знаходиться оперативний персонал і де зосереджуються необхідні для роботи персоналу прилади і апарати, такі як вимірювальні прилади, сигнальні пристрої, апаратура керування та регулювання тощо.

Вибір системи керування залежить від особливостей об'єкта, що проектується (типу станції та її обладнання, структури технологічних зв'язків, рівня автоматизації технологічного процесу), від прийнятої організаційної структури оперативного керування, а також від рівня розвитку самих систем керування.

Розвиток науки, техніки і виробництва вимагає рішення все більш складних проблем управління різними динамічними процесами в галузі механіки, електротехніки, радіоелектроніки, в екологічних і соціальних системах. Збільшення продуктивності, пружкості рухів, розмірів і потужності машин, збільшення точності і ускладнення характеру виробничого процесу або наукового експерименту ускладнюють або навіть роблять неможливим для людини досить швидко і точно управління рухом машин або ходом виробничого процесу [14].

Автоматичне регулювання - це автоматичне забезпечення заданих значень параметрів, що визначають необхідну протікання керованого процесу відповідно

до встановленої програмою. Параметри керованого процесу, що підлягають заданим змін або стабілізації - називають регульованими параметрами.

Пристрій, що забезпечує автоматичну підтримку заданого значення - регульованого параметра в керованому об'єкті або його зміни за певним законом, називають регулятором.

Всі технологічні процеси характеризуються певними фізичними величинами. Для забезпечення необхідного режиму роботи ці величини необхідно підтримувати постійними або змінювати за того чи іншого закону. Фізичні величини, що визначають хід технологічного процесу - називаються параметрами технологічного процесу.

Так параметрами технологічного процесу можуть бути тиск, температура, рівень рідини, концентрація речовини, витрата речовини або енергії, швидкість зміни якої-небудь величини і т.п. Параметр технологічного процесу, який необхідно підтримувати постійним або змінювати за певним законом - називається регульованою величиною або регульованим параметром.

Апарат, машина, агрегат або процес в якому регулюються ті чи інші параметри технологічного процесу - називаються об'єктом регулювання або регульованим об'єктом. Значення регульованої величини, яке оператор прагне отримати в сталому режимі від знаходиться в рівновазі системи регулювання при заздалегідь заданих режимах її роботи - називається заданим значенням. Значення ж регульованої величини в даний момент часу - називається її миттєвим або істинним значенням [15].

Для автоматизації управління машинами і виробничими процесами необхідне, перш за все, глибоке теоретичне і експериментальне вивчення самих процесів управління, а потім створення на основі отриманих знань широкого набору надійних і ефективних приладів, пристроїв і систем автоматики. В даний час для вирішення багатьох із вказаних проблем з успіхом застосовуються персональні комп'ютери, оснащені спеціальним програмним забезпеченням. Їх використання робить більш ефективною реалізацію аналітичних розрахунків і багатьох чисельних методів, а також дозволяє виконувати візуальне графічне моделювання, імітуючи роботу досліджуваної системи або відтворюючи структуру, що змінюється в часі складного

приладу або пристрою. Такі методи дослідження отримали назву відповідно імітаційного і ситуаційного моделювання.

Серед ряду сучасних програмних систем комп'ютерної математики особливо виділяється матрична математична система *Matlab* корпорації *Mathworksinc*. Система має потужні засоби діалогу, графіки і комплексної візуалізації, а також багаточисельні програмні пакети для розширення функцій системи: символічного диференціювання і інтеграції, ідентифікації систем, побудови і дослідження штучних нейронних систем, обробки сигналів і зображень, вирішення звичайних диференціальних рівнянь і так далі.

Одним з таких пакетів системи *Matlab* є пакет візуального імітаційного і ситуаційного моделювання *Simulink*, що дозволяє досліджувати багато лінійних і нелінійних блочних динамічних систем і пристроїв довільного призначення [16].

### 3.2. Обґрунтування вибору оптимального *LQR* – регулятора

Лінійно-квадратичний регулятор (англ. *Linear quadratic regulator, LQR*) - в теорії управління один з видів оптимальних регуляторів, що використовує квадратичний функціонал якості. Завдання, в якій динамічна система описується лінійними диференціальними рівняннями, а показник якості являє собою квадратичний функціонал, називається завданням лінійно-квадратичного управління. Широке поширення отримали лінійно-квадратичні регулятори (LQR).

Переваги:

- Безінерційність;

Недоліки:

- Потрібен зворотний зв'язок по всьому вектору стану;
- Потрібна точна модель об'єкта;
- Велика кількість ітерацій

Для безперервних лінійних систем, описуваних в просторі станів системою рівнянь [19]:

$$x' = Ax + Bu$$

З критерієм оптимальності:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + U^T R u) dt.$$



Для досліджуваної математичної моделі обертової барабанної печі матриці  $A$ ,  $B$ ,  $Q$  та  $R$  мають вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} -0.8413 & -0.1728 & -0.1411 \\ 0.5000 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2500 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R = 1;$$

$$x' = \begin{bmatrix} -0.8413 & -0.1728 & -0.1411 \\ 0.5000 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2500 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

Закон керування з від'ємним зворотнім зв'язком, знайдений по LQR-алгоритму, повинен мінімізувати критерій оптимальності:

$$u = -R^{-1}B^T P x$$

де  $P$  знаходиться з рівняння Ріккати :

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

Якщо дослідження проводиться для дискретних систем, то:

для дискретних лінійних систем, описуваних в просторі станів системою рівнянь :

$$x_{k+1} = A x_k + B u_k$$

З критерієм оптимальності:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k)$$

Закон керування з негативним зворотнім зв'язком, знайдений по LQR-алгоритму, повинен мінімізувати критерій оптимальності [20]:

$$u_k = -F x_k$$

де:

$$F = \tilde{R}^{-1} B^T P$$

$$\tilde{R} = R + B^T P B$$

де  $P$  – рішення дискретного рівняння Ріккати

$$P = Q + A^T(P - PB(R + B^T P B)^{-1} B^T P)A$$

Треба вибрати таке управління об'єктом, при якому розглядувана система приводиться з початкового стану в нуль із забезпеченням мінімуму функціоналу:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Nu(t)]dt$$

де  $Q$  і  $N$  - позитивно визначені матриці.

$\frac{1}{2} \int_0^{\infty} x^T(t)Qx(t)$  - інтегральна квадратична похибка, характеризує якість регулювання на інтервалі  $[0, \infty)$ . Необхідна якість може варіюватися в залежності від вибору значення матриці  $Q$ .

$\frac{1}{2} \int_0^{\infty} u^T(t)Nu(t)$  - відображає "енергію" управління і включається в критерій для

обмеження управління.

Потрібно знайти управління зі зворотним зв'язком, при якому замкнута система асимптотично стійка і критерій оптимальності приймає мінімальне значення. Рішення завдання можна записати у вигляді:

$$u(t) = -Kx(t)$$

Де  $K = N^{-1}B^T P(t)$ ,  $P(t)$  – рішення матричного рівняння Рікатті.

$A^T P(t) + P(t)A - P(t)BN^{-1}B^T P(t) + Q = 0$  – матричне рівняння Рікатті.

Оптимальний закон регулювання:

$$u(t) = N^{-1}B^T P(t)x(t)$$

При розрахунку параметрів оптимального регулятора в MATLAB досліджуваний об'єкт описаний в просторі станів. Для перетворення передавальної функції об'єкта регулювання до моделі в просторі станів використовується функція SS пакета Control System Toolbox:  $sys = ss(TF)$ , де  $sys$  - ім'я моделі,  $TF$  - ім'я передавальної функції об'єкта управління. При виконанні даної функції розраховуються матриці моделі в просторі станів [25].

Структурна схема замкнутої системи з лінійно-квадратичних регулятором в колі зі зворотнім зв'язком зображена на наступному рисунку 3.2.1.:

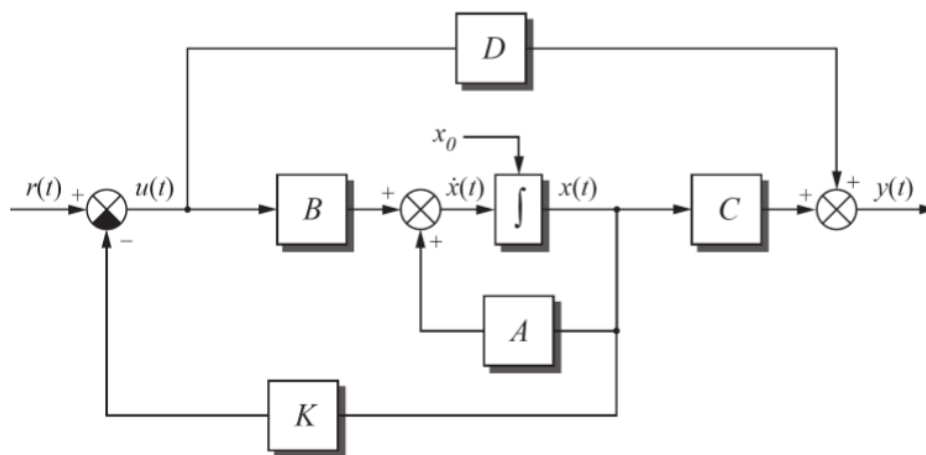


Рис. 3.2.1. Структурна схема замкнутої системи з лінійно-квадратичним регулятором (ЛКР) в колі зі зворотнім зв'язком

На даному рисунку прийняті наступні позначення:

$r(t)$  - вхід системи;

$x(t)$  - змінна стану системи і відповідно ( $\dot{x}(t)$ ) є її першою похідною);

$y(t)$  - вихід системи;

$u(t)$  - закон управління;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  - матриці системи простору станів,

$K$  - матриця зворотного зв'язку.

Для отримання рішення використовувалася спеціальна функція *lqr пакета Control System Toolbox* :  $[K, P, e] = \text{lqr}(A, B, Q, N)$ , де  $A$ ,  $B$  - матриця системи і матриця управління,  $Q$ ,  $N$  - описані раніше матриці при критерії якості. При виконанні даної функції обчислюється матриця зворотного зв'язку  $K$ , матриця Ріккати  $P$  і власні значення  $e$  матриці  $A-BK$  [20].

### 3.3. Обґрунтування необхідності використання адаптивної системи керування

Оптимальним варіантом зменшення затрат на виробництво графітованих електродів, а саме на процес прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі є розроблення методів, які забезпечуватимуть зниження витрати людської праці для інсталяції, налаштування та обслуговування *LQR*-регуляторів. Не дивлячись на те, що досить значна кількість методів автоматичного налаштування та адаптації, були розроблені у 60-х роках, у промислових контролерах адаптивність не завжди представлена. На лініях процесу прожарювання вуглецевого матеріалу проблема залишається актуальною також. Причиною цього

є технічна складність реалізації адаптивних алгоритмів на елементарній базі, що існувала до появи мікроконтролерів.

Виконання налаштування можливе вручну або автоматично, без участі людини (автоналаштування).

Автоналаштування можливе повністю автоматичне і «на вимогу», тобто коли людина являється ініціатором налаштування. Повністю автоматичне налаштування може ініціюватися при настанні умови, що заздалегідь була задана, наприклад, при зміні вологості матеріалу, який подається на прожарювання, а також навантаження, зовнішні впливи, похибки регулювання. Автоматичне налаштування, що ініціюється без участі людини називається адаптацією.

Адаптивне управління – це метод управління, що дозволяє пристосовуватися до змін параметрів обладнання завдяки зміні алгоритму управління. Більший ефект можливо отримати у випадку, якщо характеристики обладнання, наприклад час простою та коефіцієнт підсилення процесу, змінюються залежно від робочого стану або якщо необхідно залежно від ситуації узгодити декілька цілей управління [21].

Адаптивні системи надають можливість розв'язання ряду важливих задач керування:

- 1) здійснити оптимізацію роботи об'єкта;
- 2) забезпечити працездатність системи з потрібними показниками якості в умовах змінювання властивостей об'єкта;
- 3) підвищити надійність та живучість складних систем, привести до одного вигляду алгоритми керування для класів об'єктів;
- 4) зменшити вимоги до процесу проектування систем за допомогою наступного поповнення інформації в процесі функціонування;
- 5) здійснити дуальне керування з отриманням математичної моделі об'єкта в процесі експлуатації шляхом застосування спеціальних ідентифікаторів.

В функціональних адаптивних системах використовуються прямі алгоритми адаптивного керування. Пристрій, що реалізує алгоритм адаптації, називається адаптером. Особливість структури адаптивних систем полягає в тому, що порівняно зі звичайними неадаптивними системами, вони мають додатковий контур - контур

адаптації(самонастроювання), призначений для переробки інформації про умови, що змінюються, і наступної дії на регулятор основного контуру керування.

Контур, що складається з керуючого пристрою і об'єкта керування, є основним контуром системи і становить звичайну неадаптивну САК. Адаптер у загальному випадку одержує інформацію про вхідну дію  $q$ , збурення  $f$ , вихідну величину  $x$  і діє на керуючий пристрій основного контуру. Отже, адаптивна САК, крім основного контуру, має контур адаптації. Для цього контуру об'єктом керування є вся основна САК

Адаптивні системи звичайно поділяються на два класи:

- параметричні
- непараметричні

У параметричних системах структура керуючого пристрою залишається незмінною, а адаптація здійснюється за рахунок змінювання(підстроювання)значень параметрів для наближення їх до оптимальної настройки. Такі системи називаються також самонастроюваними [21].

У непараметричних системах адаптація здійснюється за рахунок змінювання структури (алгоритму функціонування) керуючого пристрою. Такі системи називаються також самоорганізуючими.

В адаптивних системах з еталонною моделлю бажаний рух об'єкта задається моделлю, що є зразком або еталоном для об'єкта і тому називається еталонною моделлю. Модель становить стаціонарну динамічну ланку з відомими параметрами, на вхід якої подають такі самі дії, що й на вхід об'єкта керування [21].

### 3.4. Синтез системи керування з *LQR*-регулятором

Контур системи з *LQR*-регулятором складається з об'єкта керування (ОК), який задано в просторі станів, тобто всі коефіцієнти передавальної функції представлено у вигляді матриць, вбудованої S-Function (в якій реалізовано скрипт для перерахунку  $K$  при різній вологості), ланки вологості матеріалу та блок, який відповідає за побудову графіка. Сам контур зображено на рисунку 3.4.1.

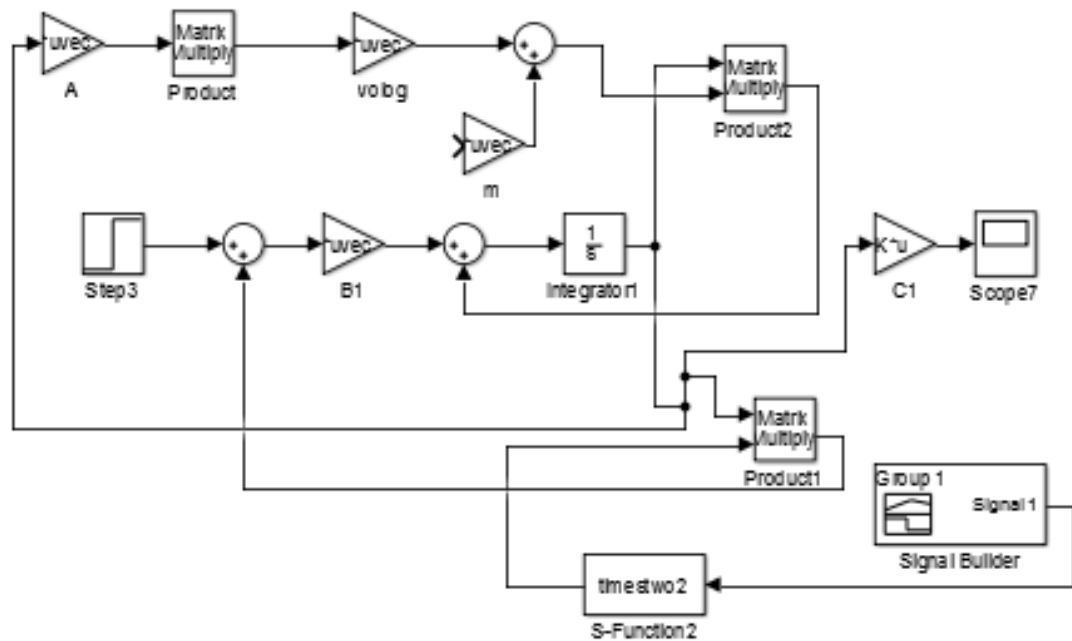


Рис.3.4.1. – Схема АСР з  $LQR$ -регулятором в *Simulink*

Так як вуглецевий матеріал на прожарювання поступає кожен раз з різним вмістом вологості, було прийнято рішення дослідити і синтезувати систему керування, яка б незалежно від вологості автоматично переналаштовувалась і процес протікав без всіляких побічних інцидентів. Тому в S-Function було реалізовано скрипт для перерахунку  $K$  при різній вологості. Скрипт представлено нижче:

```
function [sys,x0,str,ts] = timestwo2(t,x,u,flag)
```

```
switch flag,    % В залежності від значення flag виконується той чи інший метод
```

```
%=====%
```

```
% Ініціалізація %
```

```
%=====%
```

```
case 0
```

```
[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
```

```
%=====
```

```
==%
```

```
% Розрахунок значень вектора вихідних сигналів неперервної частини системи %
```

```
%=====
```

```
== case 3
```

```
sys=mdlOutputs(t,x,u);
```

```

%=====
=
% mdlInitializeSizes                                %
% функція ініціалізації                            %
% Розрахунок початкових умов, значень вектора модального часу %
% розмірності матриць                                %
%=====
=
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes()
    sizes = simsizes;
    sizes.NumContStates = 0; % Число неперервних змінних стану.
    sizes.NumDiscStates = 0; % Число дискретних змінних стану.
    sizes.NumOutputs    = 3; % Число вихідних змінних (розмір вихідного вектора).
        % Динамічний розмір вихідного вектора.
    sizes.NumInputs     = 1; % Число вхідних змінних (розмір вхідного вектора).
        % Динамічний розмір вхідного вектора.
    sizes.DirFeedthrough = 1; % Прямий прохід.
    sizes.NumSampleTimes = 1; % Розмір вектора кроків модального часу
    sys = simsizes(sizes);
    str = [];          % Параметр зарезервован для подальшого використання
    x0 = [];           % Завдання вектора початкових значень змінних стану.
    ts = [-1 0];       % Матриця із двох стовбців, яка задає кок модального часу
    зміщення. Крок продовжується з попереднього блока.
    % Кінець mdlInitializeSizes %
    %=====
    % mdlOutputs                                %
    % Функція для розрахунку значень вектора вихідних сигналів %
    %=====
function sys = mdlOutputs(t,x,u)
    A=[-0.0053 0.00004 -0.0012; -0.5 0 0; 0 0.25 0]*[1 0 0; 0 1 0; u u u]+[-0.8713 -0.1817 -
    0.1371; 0 0 0; 0 0 0]

```

```

B=[0.500; 0; 0]
K=lqr(A,B,[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1],1)
sys(1)=K(1)
sys(2)=K(2)
sys(3)=K(3)
%sys=normpdf(t,1,0.5);
%sys=normpdf(t,rand(1),0.5);
%sys=random('bino',1,0.1)
% Кінець mdlOutputs

```

Для більш спрощеного і детального пояснення схеми, яку реалізовано в середовищі Simulink було створено блок-схему, яка точно описує кожен крок. Блок-схема представлена на рисунку 3.4.2.

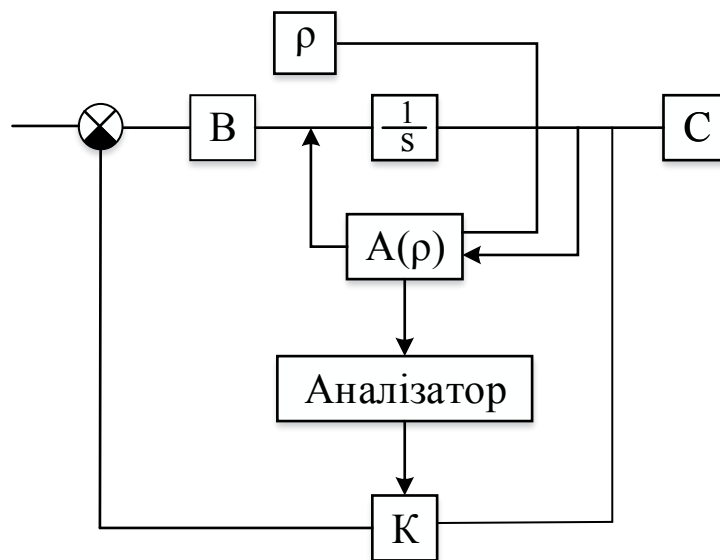


Рис 3.4.2. Блок-схема реалізації  $LQR$ -регулятора

Дана схема реалізована так: в блок, який на схемі позначено  $\rho$  необхідно задати вологість, далі необхідно в блоки  $B$  і  $C$  записати матриці  $B$  і  $C$  відповідно (дані матриці не змінюється при зміні вологості). Блок  $\frac{1}{s}$  – це інтегратор, а  $A(\rho)$  – матриця  $A$ , яка функціонально залежить від вологості матеріалу. В блоці «Аналізатор» - проходить порівняння чи змінилась вологість у вхідному матеріалі, якщо так то перераховуються коефіцієнти для нової вологості і автоматично переналаштовується регулятор для нової вологості.



Для знаходження матриць  $A$ ,  $B$ ,  $C$  в середовищі Matlab було виконаний перехід в ss-форму. Для отримання матриці  $A(\rho)$  – було визначено залежність, по якій саме проходить перерахунок коефіцієнтів для різного вмісту вологості.

На графіку перехідної характеристики (рис. 3.4.3), який представлено як результат налаштування регулятора можна побачити, що перші 160 сек подавався матеріал з вмістом вологості 5 %, а на 160 секунді подали матеріал вологість якого вдвічі більша, тобто 10 %. Відразу можна помітити, що чим більший вміст вологості в матеріалі, тим збільшується перегулювання, але незважаючи на це, налаштований регулятор навіть після подачі матеріалу з більшою вологістю за короткий період часу знову вийшов на усталений рівень.

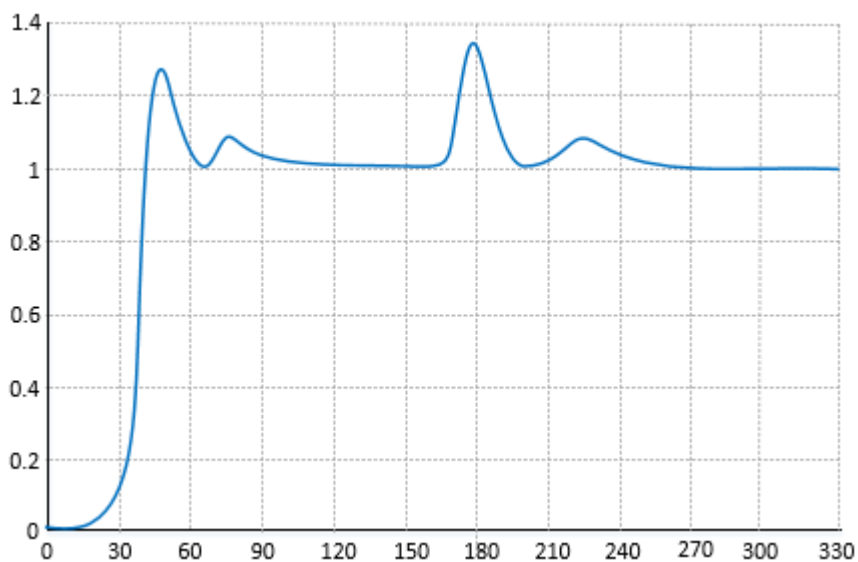


Рис. 3.4.3. Перехідна характеристика АСК з  $LQR$ -регулятором

## 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИМИ КЕРУВАННЯ З ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ ЗАСОБАМИ MATLAB

### 4.1. Обґрунтування вибору ПІ – регулятора

ПІ-регулятор являється одним з найбільш універсальних регуляторів.

Регулятори, які працюють за даним законом, виконують переміщення регулюючого органу пропорційно сумі відхилення та інтеграла від відхилення регульованої величини, тобто здійснюють П- та І- вплив. І-складова, яка доповнює алгоритм, в першу чергу необхідна для усунення статичної похибки, яка характерна для звичайного П-регулятора. По суті, інтегральна частина є накопичувальною, і таким чином дозволяє здійснити те, що ПІ-регулятор враховує в даний момент часу попередню історію зміни вхідної величини.

У динамічному відношенні ПІ-регулятор подібний системі з двох паралельно включених регуляторів: пропорційного з коефіцієнтом передачі  $K_1$  та інтегрального з коефіцієнтом передачі  $K_2$ . Реалізовується ПІ-закон за допомогою гнучкого зворотного зв'язку.

Наявність гнучкого зворотного зв'язку виключає залишкову нерівномірність у перехідному процесі. У залежності від динамічних властивостей об'єкта регулювання і настроювальних параметрів регулятора перехідний процес може бути аперіодичним або затухаючим коливальним. У першому випадку зростає амплітуда перерегулювання, але скорочується тривалість перехідного процесу, у другому – картина зворотна [22].

Передатна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W(p) = K + \frac{1}{T_i * s}$$

З формули видно, що П-складова складається з накопиченої І-складової за час  $t$ . Фактично, ПІ-регулятор «вчиться» на попередньому досвіді. Якщо система не відчуває зовнішніх збурень - регульована величина стабілізується на заданому значенні: П-складова буде дорівнювати 0, а інтегральна складова повністю забезпечить вихідний сигнал [22].

Швидкість переміщення виконавчого механізму в ПІ - регулятор пропорційна як швидкості зміни регульованої величини, так і самому зміни регульованої величини.

Якщо під час налаштування ПІ - регулятора встановити дуже велику величину постійної часу  $T_i$ , то він перетвориться в П - регулятор.

Якщо під час налаштування регулятора встановити дуже малі значення  $k$  і  $T_i$ , але при цьому так, щоб їх ставлення  $k / T_i$  мало істотну величину, отримаємо І - регулятор з коефіцієнтом передачі по швидкості  $k / T_i$ .

Параметрами налаштування ПІ - регулятора є коефіцієнт пропорційності  $k$  і постійна часу інтегрування  $T_i$  [23].

#### **4.2. Синтез системи керування з ПІ-регулятором**

В даному випадку контур системи з ПІ-регулятором складається з трьох так званих «блоків», перший з яких являє собою еталонну модель і включає в себе номінальний об'єкт керування (вміст вологості в матеріалі 0 %) та вбудований блок ПІ-регулятора (ця схема розташована на рис. 4.2.1. з самого вверху і була реалізована для порівняння отриманих налаштувань). Другий блок складається зі змінного об'єкта керування (ОК) та зі змінними параметрами регулятора, тобто при зміні вмісту вологості в матеріалі дана схема буде перераховувати налаштування П та І – складових. Та останній третій блок складається зі змінного об'єкта керування та незмінних параметрів регулятора (на схемі цей блок зображено з самого низу). Описаний вище контур зображено на рисунку 4.2.1.

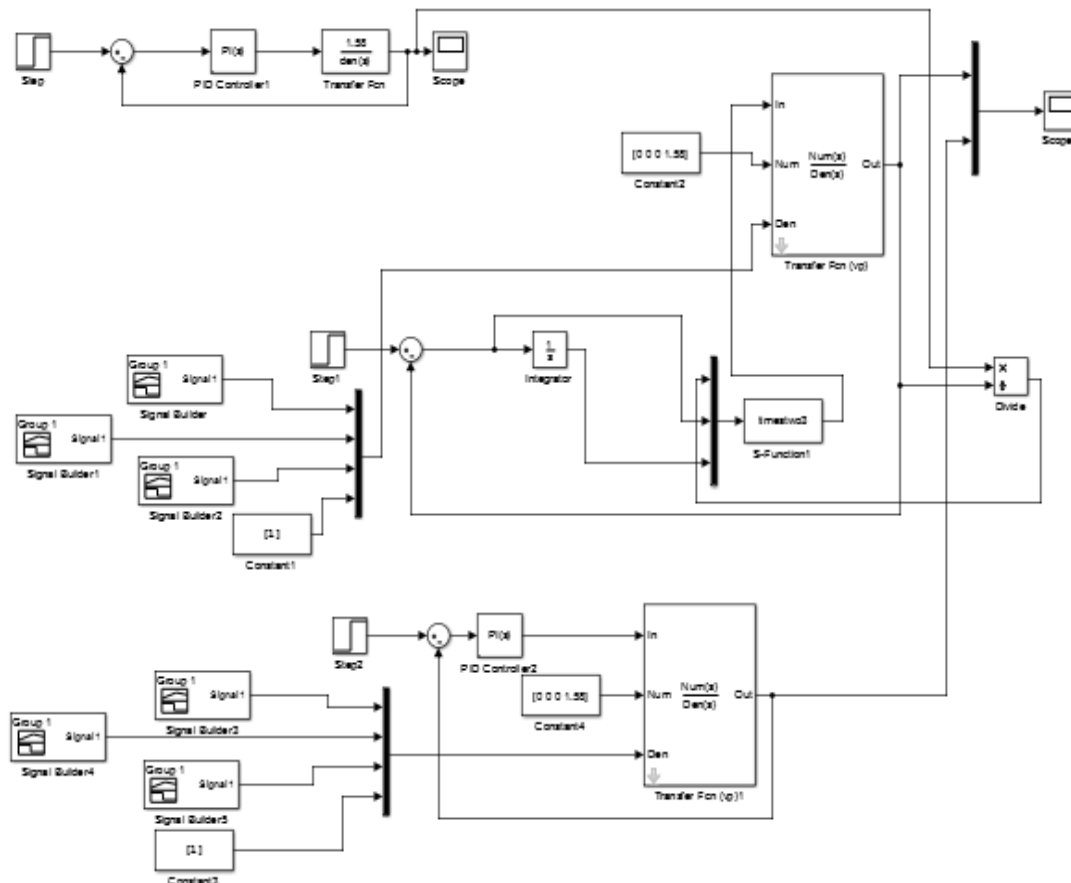


Рис. 4.2.1. – Схема АСР з ПІ-регулятором в Simulink

Налаштування коефіцієнтів ПІ-регулятора здійснюється за допомогою вбудованих засобів Simulink, а саме блоку PID Controller. Цей інструмент автоматично робить підбір коефіцієнтів обраного типу регулятора, будує перехідну характеристику, а також показує формулу обраного регулятора. Результати зображено на рис. 4.2.2.

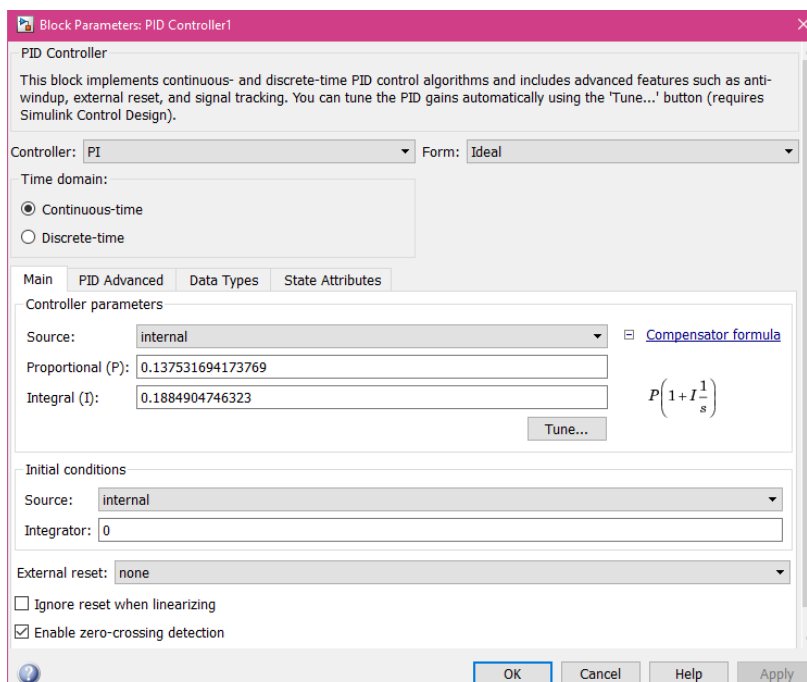


Рис. 4.2.2. Результат роботи блоку *PID Controller*

Як результат отриманих налаштувань було отримано перехідну характеристику ПІ- регулятора, яка зображена нижче.

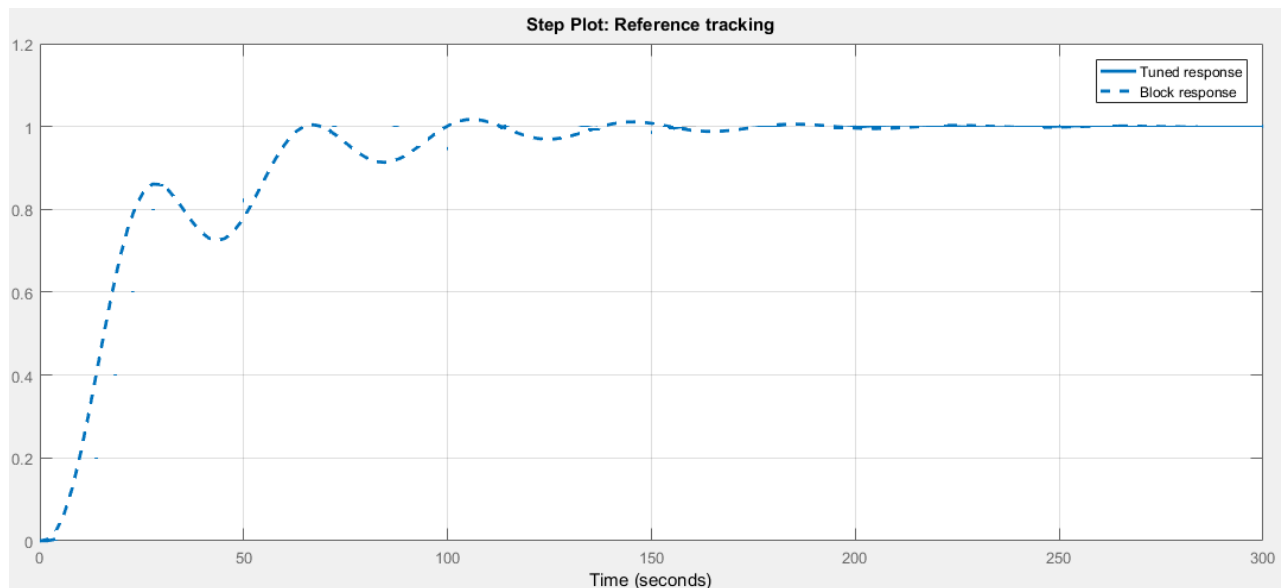


Рис. 4.2.3. Перехідна характеристика блоку ПІ-регулятора

Під час налаштування коефіцієнтів важливим є запитання якості управління. Залежно від мети, для котрої використовується наш регулятор залежить вибір критерію якості управління. Такою метою можливо є [19]:

- забезпечення підтримки постійного значення параметра (наприклад для температури);
- стеження за змінною уставки або програмне керування;
- керування подачею газу.

Для певної задачі найбільш важливими чинниками можуть бути:

- форма відгуку на зовнішнє збурення (перерегулювання, час становлення, коефіцієнт згасання та інші);
- форма відгуку на сигнал установки;
- форма відгуку на шуми вимірювань;
- вимоги до енергозощадження у керованій системі;
- мінімум шумів вимірювань та інші .

Для виконання системи керування у даній магістерській дисертації для першого блоку (еталонна модель) було використано вбудований блок *PID Controller* в *Simulink*, в якому було обрано тип ПІ-регулятора.

Для реалізації автоматичного перерахунку коефіцієнтів та налаштування модального ПІ-регулятора було реалізовано другий так званий блок, який представлений на рис.4.2.1 по середині. В даному випадку ПІ-регулятор вже задається не вбудованим в *Simulink* блоком, а була створена схема, яка включає в себе: 3 блоки Signal Builder в яких було задано, що до 200 с подається матеріал з номінальною вологістю, а на 201 с можна спостерігати, що почали подавати в обертову барабанну піч матеріал з іншою вологістю і на перехідній характеристиці, яка зображена на рис. 4.2.2 – це можна спостерігати. Для раціонального перерахування коефіцієнтів було використано блок S-Function в якому реалізований такий скрипт:

```
function [sys,x0,str,ts] = timestwo3(t,x,u,flag)
```

```
switch flag, % В зависимости от значения переменной flag происходит
```

```
    % вызов того или иного метода:
```

```
    %=====%
```

```
    % Инициализация %
```

```
    %=====%
```

```
    case 0
```

```
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
```

```
    %=====
```

```
    %
```

```
    % Расчет значений вектора выходных сигналов непрерывной части системы %
```

```
    %=====
```

```
    %
```

```
    case 3
```

```
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
```

```
    %=====%
```

```
    % Неиспользуемые значения переменной flag %
```

```
    %=====%
```

```
    % В примере не используются методы для завершения работы S-функции,
```

```
    % нет непрерывных и дискретных переменных состояний,
```

```
    % поэтому значения переменной flag = 1, 2, 4, 9 не используются.
```

% Результатом S-функции в этом случае Является пустая матрица.

case { 1, 2, 4, 9 }

sys=[];

%=====

% Неизвестное значение переменной flag %

%=====

otherwise

error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);

end

% Окончание функции timestwo

%=====

=

% mdlInitializeSizes %

% Функция инициализации %

% Расчет начальных условий, значений вектора модельного времени,%

% размерности матриц %

%=====

=

function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes()

sizes = simsizes;

sizes.NumContStates = 0; % Число непрерывных переменных состояния.

sizes.NumDiscStates = 0; % Число дискретных переменных состояния.

sizes.NumOutputs = -1; % Число выходных переменных (размерность выходного вектора).

% Динамическая размерность выходного вектора.

sizes.NumInputs = 3; % Число входных переменных (размерность входного вектора).

% Динамическая размерность входного вектора.

sizes.DirFeedthrough = 1; % Прямой проход. Есть проход входного сигнала на выход.

sizes.NumSampleTimes = 1; % Размерность вектора шагов модельного времени.

```

sys = simsizes(sizes);
str = [];           % Параметр зарезервирован для будущего использования.
x0 = [];           % Задание вектора начальных значений переменных состояния.
                    % Переменных состояния нет, поэтому значение параметра -
                    % пустая матрица.
ts = [-1 0];       % Матрица из двух колонок, задающая шаг модельного
                    % времени и
                    % смещение. Шаг наследуется из предшествующего блока.
% Окончание mdlInitializeSizes
%=====
% mdlOutputs          %
% Функция для расчета значений вектора выходных сигналов %
%=====
function sys = mdlOutputs(t,x,u)
if t<1
    sys = 0.137531694173769*u(2)+0.137531694173769*0.1884904746323*u(3)
else
    if u(1)<=1
        sys = 0.137531694173769*u(2)+0.137531694173769*0.1884904746323*u(3)
    else
        sys =
0.137531694173769*u(2)*u(1)*10+0.137531694173769*0.1884904746323*u(3)-
u(1)/100
    end
end
%sys=normpdf(t,1,0.5);
%sys=normpdf(t,rand(1),0.5);
%sys=random('bino',1,0.1)
% Окончание mdlOutputs

```



На третьому блоці, який розташований нижче двох попередніх, складена схема яка складається зі змінного об'єкта та незмінного регулятора. Тобто налаштування регулятора використовуємо точно таке, як і еталонній моделі.

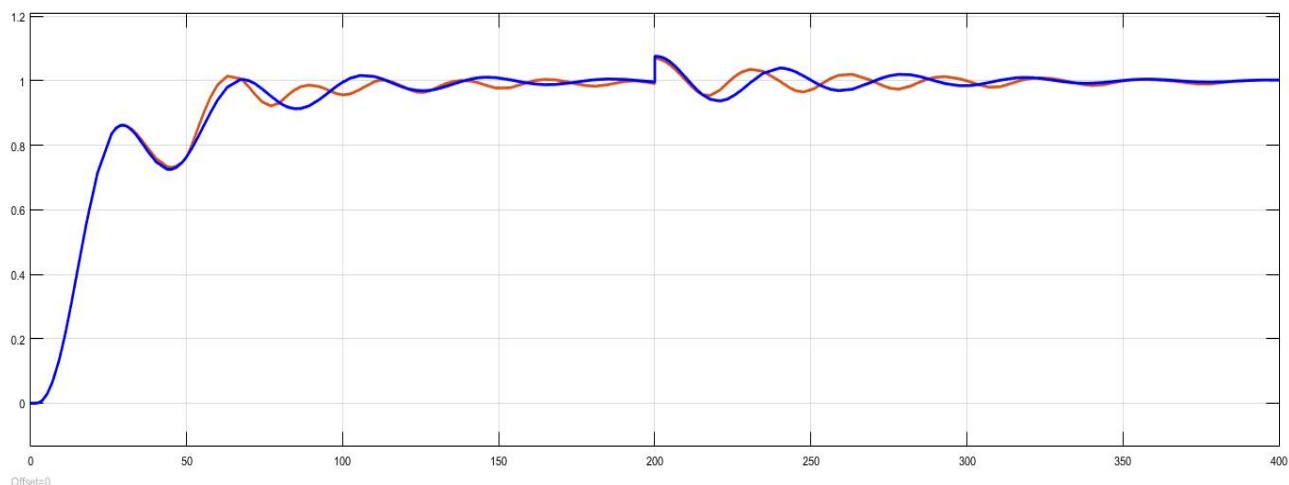


Рис. 4.2.2. Перехідні характеристики АСР з звичайним та адаптивним ПІ-регулятором

Отримані перехідні характеристики можна пояснити так, що налаштований нами модальний ПІ-регулятор має більше перерегулювання, але швидше виходить на усталений рівень. В нашому випадку основною метою є якнайшвидше вийти на усталений рівень, так як необхідно весь поданий матеріал прожарити однорідно незалежно від його вмісту вологості.

Отже, в загальному створена схема працює так: спочатку прораховуємо відношення ідеальної моделі (при номінальній вологості) до реальної (змінна модель) і по відношенню приймаємо рішення по переналаштуванню регулятора. Якщо дане відношення не відповідає номінальному, то до П та І – складові змінюються на це відхилення.

## 5. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРОЖАРЮВАННЯ КОКСУ І АНТРАЦИТУ В ОБЕРТОВІЙ БАРАБАННІЙ ПЕЧІ

Основною задачею магістерської дисертації було дослідження різних систем керування, які дають можливість підвищити стан управління температурним режимом в обертівій барабанній печі для отримання однорідного матеріалу після прожарювання.

Для обґрунтування застосування однієї чи іншої системи керування потрібно провести порівняння якості перехідних процесів створених систем.

Порівняння було проведено для:

- а) АСР із  $LQR$ -регулятором
- б) АСР із ПІ-регулятором

В обох регуляторах було реалізовано налаштування на змінний вміст вологості у вхідному матеріалі і обидва налаштовані регулятори адаптивні, але було прийнято рішення також провести порівняння по таких основних показниках:

- Час регулювання - це проміжок часу  $t_p$  від моменту надходження на вхід ступінчастого впливу (завдання, збурення) до моменту, коли відхилення регульованої величини від заданого значення стає меншим деякого відносно малого числа  $\delta$  (зона нечутливості регулятора). Прийнято вважати, що перехідний процес закінчиться в той момент часу, починаючи з якого, відхилення регульованої величини відрізняється від сталого значення не більш ніж на 5 %.
- Перерегулювання — максимальне відхилення керованої величини від нового заданого значення в бік, протилежний від початкового значення. У тих випадках, коли керована величина наближається до нового значення тільки з одного боку перерегулювання відсутнє [24].

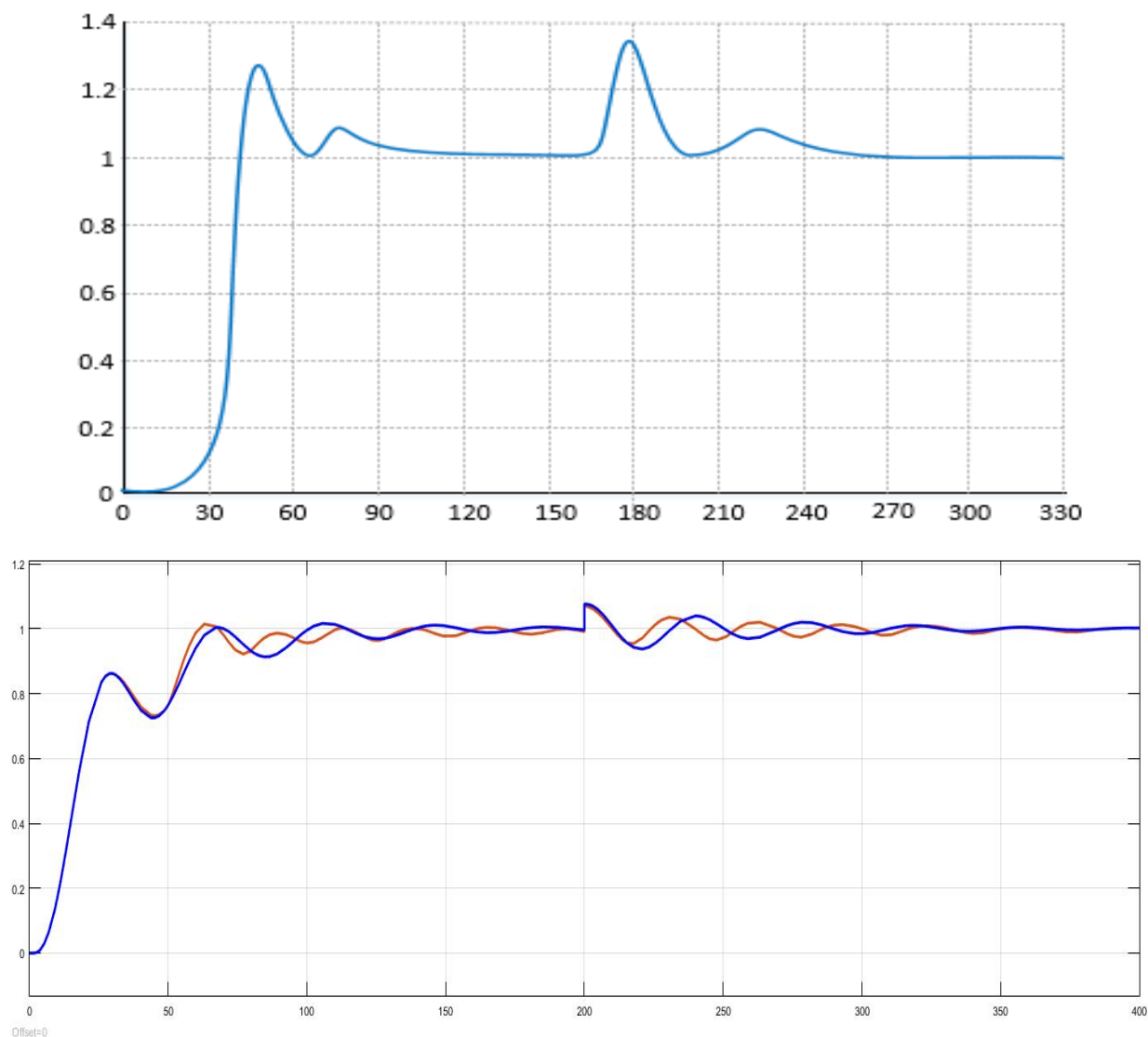


Рисунок 5.2.1. – Графіки перехідних процесів в АСР зверху вниз: АСР з ПІ-регулятором, АСР с *LQR*-регулятором,

Таблиця 5.1.1. – Результати.

	АСР із LQR – регулятором ( $\rho = 0$ )	АСР із ПІ- регулятором ( $\rho = 0$ )	АСР із LQR – регулятором ( $\rho = 10$ )	АСР із ПІ- регулятором ( $\rho$ = 10)
Перерегулюв ання, %	23 %	2 %	28 %	6 %
Час встановлення, с	120	190	270	330

Із отриманої таблиці ми можемо зробити наступні висновки:

1) На заданий режим найшвидше виходить АСР із  $LQR$ -регулятором, повільніше – АСР з ПІ-регулятором.

2) Найбільше перерегулювання, як було припущено раніше, в АСР із  $LQR$ -регулятором. Найменше перерегулювання у АСР з ПІ-регулятором, це пояснюється повільним і поступовим виходом, без скачків, на усталений рівень. Перерегулювання в обох випадках, як можна побачити на графіках зростає при збільшенні вмісту вологості в матеріалі і на жаль змінити це поки не можливо навіть застосувавши інші регулятори.

Окрім порівняння критеріїв якості для більш детального дослідження було отримано результати відносних емпіричних переваг і недоліки систем керування температурним режимом оберткової барабанної печі. Ці дані наведено у таблиці 5.1.2.

**Таблиця 5.1.2.** Емпіричні результати

Система Критерій	АСР з ПІ-регулятором	АСР с $LQR$ -регулятором
Математична модель	Обов'язкова	Обов'язкова
Обчислювальна складність	Середня	Висока
Наявність розробок-аналогів для печей прожарювання	Наявні	Наявні
Витрати людських ресурсів на побудову системи	Невисокі: Оператор	Оператор-експерт, який має створити перерахунок для різної вологості; розробник
Час відгуку моделі протягом моделювання системи	Моделювання відбувається швидко (Matlab)	Моделювання відбувається швидко (Matlab)

## **6. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «СТВОРЕННЯ РЕКУПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ»**

### **6.1. Вступ до розробки стартап-проекту**

Стартап - це тільки що створена компанія (можливо навіть не є юридичною особою), яка знаходиться на стадії розвитку і будує свій бізнес на основі нових інноваційних ідей, або на основі технологій, які нещодавно з'явилися.

Однією з основних причин створення, успішного розвитку та подальшого існування стартапів вважають неповороткість і повільність великих корпорацій, які успішно використовують уже наявні продукти, а розробкою і створенням нових майже не займаються. Тому стартапи, завдяки своїй мобільності в плані втілення нових ідей складають конкуренцію великим корпораціям.

Основним ресурсом для створення нового стартапу служить хороша новаторська ідея. Власне за свіжими і незвичайними ідеями женеться більшість і часто, купуючи їх, не шкодують великі суми грошей. Сама ідея, що не має ніякого матеріального втілення, а існує тільки на папері, або "на словах" (план стартапу), може коштувати дуже багато. Іншим фактором успішності цієї ідеї є її затребуваність (ступінь необхідності для споживача), адже ідея може бути незвичайною і новою, але користі від неї буде мінімум.

Що стосується України, існує дуже багато різних компаній, які надають свої послуги у вигляді навчання і натхнення, мотивації до успіху підприємців, молоді та дітей. Це дуже зручно і вигідно, тому що людині допомагають реалізувати свій бізнес професіонали. Але будь-який бізнес вимагає звичайно вкладення чималих коштів, які в нашій країні, знайти дуже важко, враховуючи те, що банківська система в Україні надає жорсткі умови кредитування, а знайти інвесторів і зацікавити в нашій небагатій країні складно, а також існують ризики і тиск з боку конкурентів і влади [25].

### **6.2. Опис ідеї стартап-проекту**

Автоматизація технологічних процесів є ключовою ланкою у загальній системі функціонування будь-якого хімічного виробництва. Сучасна автоматизація – це не

лише персональні комп'ютери, контролери, промислові мережі, а і, звичайно ж, програмне забезпечення. Основною проблемою на більшості виробництв України і світу, які навіть оснащені найдорожчими і найточнішими пристроями автоматизації є виділення великої кількості тепла в навколишнє середовище. Тепло, яке можна використовувати для зменшення витрат на опалення, підігрів води чи будь-чого іншого на сьогоднішній день просто виділяється в навколишнє середовище.

Рекуперація - це зворотне надходження певного матеріалу для повторного використання. У більшості випадків рекуперація представлена обміном повітря через спеціальний прилад, при якому відбувається ще й істотне зниження витрати електроенергії. Рекуперативна вентиляція міцно зійшла на п'єдестал лідера і залишиться там, швидше за все, назавжди. Ще б, адже витрати на обслуговування такої припливно-витяжної системи мінімальні. Споживання електроенергії настільки мінімально, що ті, хто знайомий з популярними колись кондиціонерами, хочуть їх замінити на рекуператор. Споживання електроенергії рекуператорних систем рівносильне споживанню лампочки в холодильнику і навіть менше горезвісних енергозберігаючих ламп. Системи вентиляції з рекуперацією повітря зараз широко представлені. Ці прилади мають мінімальні розміри, практично непомітні серед інтер'єру приміщення, є дуже тихими при режимі роботи. ККД рекуператорів дозволяє домогтися мінімум витрат на енергію при максимумі корисної роботи [26].

Основна ідея розроблення стартап проекту полягає у створенні рекупераційних систем для технологічних процесів або навіть апаратів, які виділяють велику кількість тепла під час протікання процесу, тобто розробка систем, які дають можливість на повторне використання тепла, що виділяється.

Можливість застосовувати такі системи буде у будь-якого хімічного, харчового чи будь-якого іншого виробництва під час протікання якого виділяється велика кількість тепла.

На сьогоднішній день на ринку представлена велика кількість компаній, які виробляють рекупераційні системи, але більшість таких компаній не можуть вирішити проблему з таким обладнанням саме на великих виробництвах, де

встановлені технологічні апарати. Тому створена рекупераційна система здатна буде вирішити проблему виділення тепла саме на великих підприємствах.

Реалізація такої системи, розглядається для обертової барабанної печі в якій відбувається прожарювання коксу та антрациту. Було визначено, що даний процес протікає за високих температур і виділяється велика кількість тепла в навколишнє середовище в зоні печі, де розташований пальник. Тому реалізація для обертової печі буде представлена так: необхідно розмістити трубу спіральної форми по якій буде подаватись холодна вода і від тепла, яке виділяється з барабанної печі буде нагріватись вода, яку далі можна використовувати на опалення та постачання гарячої води на виробництві, тобто застосувати рекуперацію у процесі прожарювання вуглецевого матеріалу.

Складність і потреба спеціальних знань при створенні систем, які дозволяють використовувати виділене тепло для повторного використання визначили створення окремої галузі ринку, що надає послуги зі створення та обслуговування таких товарів [26].

**Таблиця 6.2.1.** – Опис ідеї стартап-проекту

Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Застосування систем в будь-якій сфері виробництва	Використання виділеного тепла повторно
Обігрів приміщень в зимовий період	Заощадження ресурсів: електроенергії, газу, тепла
Застосування рекупераційних систем для створення оптимального мікроклімату в приміщеннях	Нормалізація таких санітарні характеристик, як відносна вологість повітря, його температура і швидкість руху

### **6.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту**

Необхідно визначити перелік слабких ( $W$ ), сильних ( $S$ ) та нейтральних характеристик ( $N$ ) та властивостей ідеї проекту для формування його конкурентоспроможності [27].

**Таблиця 6.3.1. – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту**

№ п/ п	Техніко- економічні характеристи ки ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтрал ьна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкур ент 1	Конкур ент 2	Конку- рент 3			
1.	Застосуванн я систем в будь-якій сфері	+	-	-	+			+
2.	Обігрів приміщень в зимовий період	+	+	-	+			+
3.	Застосуванн я рекуперацій них систем для створення оптималь- ного	+	-	+	-		+	
4.	Заощадженн я ресурсів: еле ктроенергії, газу, тепла	+	+	+	-			+

#### 6.4. Технологічний аудит ідеї проекту

Наразі буде більш детально розглянуто рекуперацію тепла у хімічному процесі прожарювання вуглецевого матеріалу в обертових барабанних печах.

Найбільш близькою за технічною суттю є обертова барабанна піч, яка складається з: циліндричного корпусу, обичайки, вогнетривкої футеровки,



підтримувальних бандажів та роликів, розвантажувальних головок та газового пальника, який спрямований на зустріч руху матеріалу. Недоліком цієї барабанної печі є велика кількість виділення тепла в навколишнє середовище в зоні розташування газового пальника.

В основу покладено задачу ефективного використання виділеного тепла шляхом підігріву води, яку потім можна використовувати, наприклад для опалення заводу.

Під час прожарювання вуглецевого матеріалу температура в зоні, де розташований пальник дуже висока, при цьому відбувається інтенсивне виділення тепла в навколишнє середовище, тому було прийнято рішення розмістити трубу спіральної форми по якій буде подаватись холодна вода і від тепла, яке виділяється з барабанної печі буде нагріватись вода, яку далі можна використовувати на опалення та постачання гарячої води на виробництві, тобто застосувати рекуперацію у процесі прожарювання вуглецевого матеріалу.

Суть запропонованої рекупераційної системи пояснюється рис.7.3, на якому зображено, де саме повинна розміщуватись і яку форму повинна мати труба для підігріву води.

Барабанна обертова піч працює наступним чином: подрібнений вуглецевий матеріал по системі конвеєрів 1 транспортують в пічний бункер. Кокс чи антрацит за допомогою зважувального дозатора 2 потрапляє в барабан 3. Піч протivotочного типу: сировину через завантажувальний пристрій подають назустріч потоку відводять газів, отриманих в результаті спалювання природнього газу і горючих компонентів летких речовин, які виділяються в процесі прожарювання. Природній газ подається в піч через газо-горючий пристрій 6, який встановлений в торцевій стінці нижньої головки печі. Повітря на згорання подається вентиляторами 4 і 5 двома потоками: один саме до пальника, другий через стінку печі в зону інтенсивного виділення летких речовин. Найвища температура завжди біля пальника 6, тому саме в тій зоні на рис. 7.3. можна побачити розташовану трубу, по якій подають холодну воду на обігрів.

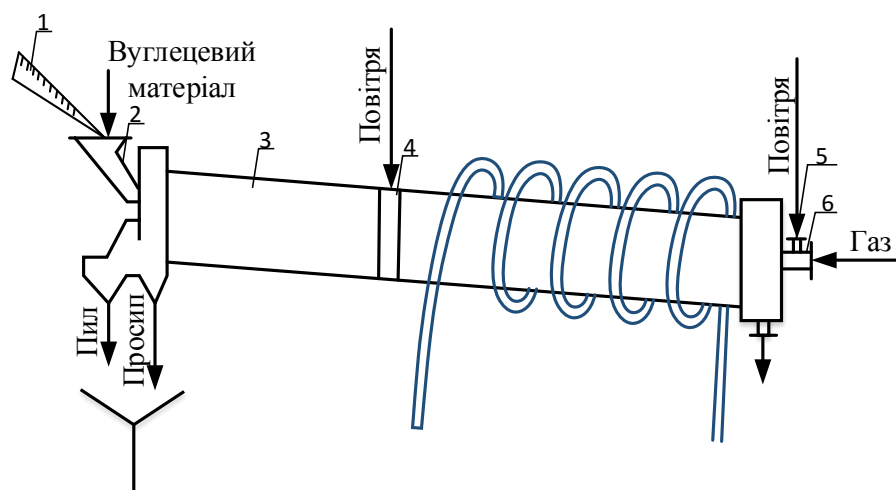


Рис. 6.4.1. Рекуперативна система для обертової барабанної печі

## 6.5. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики та формуємо орієнтовний перелік вимог до рекуперативних систем, як товару для кожної групи (табл. 6.5.1) [27].

**Таблиця 6.5.1.** – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

<b>№ п/п</b>	<b>Потреба, що формує ринок</b>	<b>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</b>	<b>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп</b>	<b>Вимоги споживачів до товару</b>
1.	Базова потреба, яку задовольняє товар (згідно концепції потенційного товару)	Визначити потенційні цільові групи клієнтів, що можуть бути зацікавлені у задоволенні означеної потреби	Вписати фактори, що формують поведінку клієнта (стандарти, технічні регламенти, інші фактори цінового та нецінового характеру) та особливості купівлі та	- до продукції - до компанії-постачальника
2.	Рекуперація тепла виробництва	Виробництва, підприємці	ДСТУ, ГОСТ, ГДС	Спрощення певних етапів виробництва; Зменшення ресурсовитрат.
3.	Оперативність в реагуванні на неефективне виділення тепла	Виробництва, підприємці	ДСТУ, ГОСТ, ГДС	Оперативне сповіщення про проблеми в роботі процесу
4.	Створення реальної рекупераційної системи виробництва	Виробництва, підприємці	ДСТУ, ГОСТ, ГДС	Реальні системи використання на виробництво та нормалізація таких санітарних характеристик.

Після проведення аналізу та визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища з використання рекупераційних систем. Тому складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 6.5.2) [21].

Таблиця 6.5.2 – Фактори загрози

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Спад виробництва в галузях господарства	Нема потреби у продукті	
2.	Економічне відкриття кордонів	Прихід новітніх технологій	Використання новітніх технологій
3.	Зростання інфляції	Падіння платоспроможності в тому числі і підприємств з якими співпрацюємо	Гнучке ціноутворення

Таблиця 6.5.3 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Політика протекціонізму	Захист вітчизняного виробника внаслідок чого буде розвиватися галузь споживача стартапу.	Залучення у коло споживачів споріднених галузей
2.	Стимулювання розвитку інноваційного підприємництва	Зменшення податкового тиску на стартап.	Масштабування стартапу

Проводимо аналіз (табл. 6.5.4.) пропозиції: визначаємо загальні риси конкуренції на ринку з використання рекупераційних систем [27].

Таблиця 6.5.4 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути
Тип конкуренції	Монополістична конкуренція	Конкуренція, ринкова ситуація, за якої відносно велика кількість невеликих виробників пропонують схожу але не ідентичну продукцію.

Рівень конкурентної боротьби	Національний рівень	Національна конкуренція і конкурентоспроможність окремих фірм, підприємств і організацій відбувається і проявляється на національному
За галузевою ознакою	Міжгалузева	Застосування рекупераційних систем можливе у різних галузях виробництва
Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова конкуренція	Відстеження тенденцій на ринку з можливістю появи на ринку продуктів-замінників.
За характером конкурентних переваг	Цінова	Гнучке ціноутворення з урахуванням динаміки попиту. Удосконалення технології, що спрямована на підвищення базових переваг.
За інтенсивністю - марочна/не марочна	Немарочна	Забезпечення масштабованості стартапу в найближчій перспективі для створення стійкого сприйняття стартапу як окремої бізнес одиниці.

Проводимо оцінку привабливості стратегічної зони господарювання (СЗГ) стартапу із застосуванням методу Дельфі. На першому етапі була проведена оцінка зміни в прогнозованому збільшенні стратегічної зони господарювання (G) методом Дельфі (табл. 6.5.5.) [27].

На другому етапі проведено оцінку прогнозованих тенденцій зміни рентабельності СЗГ (Р) (табл. 6.5.6)

**Таблиця 6.5.6 – Аналіз оцінки змін рентабельності СЗГ (Р)**

[illegible]

На третьому етапі визначимо рівень впливу загроз ( $-Q_i$ ) і використання можливостей ( $+Q_i$ ) зовнішнього середовища для підприємства в даній СЗГ (табл. 6.5.7). Оцінювання кожного чинника відбувається за шкалою від -5 до +5 балів. Зважена оцінка визначається як результат множення оцінки чинника, значущості групи факторів та значущості чинника в групі, до якої даний чинник належить. Негативна зважена оцінка розглядається як потенційна загроза, а позитивна - як можливість для організації в даній СЗГ [27].

**Таблиця 6.5.7** – Оцінка зовнішніх погроз і можливостей для підприємства

Група чинників	Чинники	Значущість групи чинників	Значущість чинника в групі	Оцінка чинника	Зважена оцінка	
					загрози	можливості
1	2	3	4	5	6	7
1. Економічні	Темпи інфляції	2,8	0,14	4		1,7
	Стабільність курсу гривни		0,39	3		2,55
	Тарифи на транспорт і енергоресурси		0,21	-3	-1,675	
	Податкові ставки		0,23	-2	-1	
2. Політичні	Державне регулювання ринків	0,8	0,2	4		0,48
	Інвестиційна політика		0,32	3		0,56
	Політична стабільність		0,19	-3	-0,38	
	Законодавча база для регулювання підприємницької діяльності		0,27	0	0	
3. Ринкові	Інтенсивність конкуренції	1,6	0,14	2		0,59
	Ціни на чинники виробництва		0,26	1		0,38
	Укладення прямих договорів		0,45	-4	-2,45	
	Динаміка попиту і пропозиції		0,16	3		0,64
4. Чинники конкуренції	Агресивність конкуренції	1,9	0,38	4		2,1
	Тенденції зміни числа конкурентів		0,49	-3	-2,035	
	Переваги лідерів галузі		0,22	3		0,8
5. Виробничо-технологічні	Стан виробництва	2,8	0,23	-2	-1,15	
	Можливість нових технологічних		0,36	1		0,8
	Рівень технології		0,19	3		1,376

	конкурентів					
	Доступність ресурсів		0,32	-2	-1,53	
6. Соціальні	Соціальна напруженість в галузі	1,5	0,35	2		1,05
			0,27	4		1,62
	Підвищення кваліфікації кадрів		0,38	-2	-1,14	
	Юридичні обмеження в бізнесі					
Підсумкова оцінка		11,4	-	-	-11,36	14,646

На підставі отриманих результатів розраховано значення привабливості СЗГ за формулою:

$$\text{Привабливість СЗГ} = \alpha G + \beta P + \gamma (O - T),$$

де  $\alpha = 0.4$ ,  $\beta=0.3$ ,  $\gamma=0.3$ ;

$G$  - зміни в прогнозованому збільшенні СЗГ;

$P$  - зміни в рентабельності СЗГ;

$+Q_i$  та  $-Q_i$  - відповідно оцінки можливостей та загроз для організації.

$$\text{Привабливість СЗГ} = 0,4 \cdot 10 + 0,3 \cdot 17 + 0,3 \cdot (14,646 - 11,36) = 10,0858.$$

На четвертому етапі оцінюємо (табл. 6.5.8) рівень привабливості за відповідною шкалою [27].

**Таблиця 6.5.8** – Шкала оцінювання привабливості СЗГ

Значення	Характеристика
-50...-46	Дуже неприваблива
-45...-36	Високо неприваблива
-35...-26	Достатньо неприваблива
-25...-16	Помірно неприваблива
-15...-6	Майже неприваблива
-5...+5	Відсутність привабливості
+6...+15	Майже приваблива
+16...+25	Помірно приваблива
+26...+35	Достатньо приваблива
+36...+45	Високо приваблива
+46...+50	Дуже приваблива

Значення привабливості СЗГ (11.5035) потрапляє в інтервал від 6 до 15, що може вважатися майже привабливим для підприємства. Позитивно слід оцінювати



спрямованість показників  $G$  та  $P$ , які свідчать про непогані перспективи діяльності підприємства в даній СЗГ.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей (табл. 6.5.9).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення [27].

**Таблиця 6.5.9 – SWOT- аналіз стартап-проекту**

<p><i>Сильні сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• контроль за здійсненням витрат, пошук можливостей щодо їхнього зниження;</li> <li>• інвестиційна привабливість підприємства;</li> <li>• зважена цінова політика;</li> <li>• врахування потреб споживачів.</li> </ul>	<p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• частка ринку;</li> <li>• результативність рекламної політики;</li> <li>• організація системи комунікацій.</li> </ul>
<p><i>Можливості:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• зростання грошових доходів населення;</li> <li>• застосування сучасних технологій організації товароруху;</li> <li>• впровадження різних форм організації торгівлі.</li> </ul>	<p><i>Загрози:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• недосконалість та змінюваність законодавства;</li> <li>• інфляційні процеси;</li> <li>• високий рівень безробіття.</li> </ul>

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок [27].

Визначені альтернативи аналізуються (табл. 6.5.10) з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

**Таблиця 6.5.10 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту**

<b>№ п / п</b>	<b>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</b>	<b>Ймовірність отримання ресурсів</b>	<b>Строки реалізації</b>
1.	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу.	висока	1 рік
2.	Стратегія підсилення сильних сторін за рахунок ринкових можливостей.	висока	6 місяців
3.	Стратегія компенсації слабких сторін наявними ринковими можливостями.	середня	2 роки
4.	Стратегія виходу з ринку	низька	не має

Обираємо стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу

### **6.6. Розроблення ринкової стратегії проекту**

Розроблення ринкової стратегії (табл. 6.6.1) передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів [27].

**Таблиця 6.6.1 – Вибір цільових груп потенційних споживачів**

<b>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</b>	<b>Готовність споживачів сприйняти продукт</b>	<b>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</b>	<b>Інтенсивність конкуренції в сегменті</b>	<b>Простота входу у сегмент</b>
Підприємства, де для виробництва використовується велика кількість печей або інших апаратів, які виділяють велику кількість тепла.	висока	специфічний	помірна	високий бар'єр входу у галузь

Проаналізувавши потенційні групи споживачів обираємо цільові групи та визначаємо стратегію охоплення ринку. Оскільки компанія працює із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу, то використовуємо стратегію диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку сформулюємо базову стратегію розвитку, а саме стратегію диференціації [28].

**Таблиця 6.6.2 – Визначення базової стратегії розвитку**

<b>Обрана альтернатива розвитку проекту</b>	<b>Стратегія охоплення ринку</b>	<b>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</b>
Стратегія диференціації	Ринкове позиціонування	<ul style="list-style-type: none"> <li>• по відношенню до прямих конкурентів диференціація знижує ступінь замінності товару, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність;</li> <li>• прихильність клієнтів послабляє їх тиск на фірму і перешкоджає приходу на ринок нових конкурентів;</li> <li>• підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дій сильного постачальника;</li> <li>• відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників.</li> </ul>

**Стратегія диференціації** передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару (у ширшому розумінні – комплексі маркетингу), бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування [28].

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку

та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування (табл. 6.6.3), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект [27].

**Таблиця 6.6.3 – Визначення стратегії позиціонування**

<b>Вимоги до товару цільової аудиторії</b>	<b>Базова стратегія розвитку</b>	<b>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту</b>	<b>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</b>
<p>Рекупераційні системи повинні мати можливість:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• графічного представлення ;</li> <li>• зображення всіх необхідних компонентів (технологічний апарат та рекупераційна установка);</li> <li>• оцінки роботи отриманої системи з рекуперацією;</li> </ul>	Стратегія диференціації	<p>До конкурентних переваг слід віднести:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• оптимальна ціна за необхідну рекупераційну установку;</li> <li>• швидкодія роботи;</li> <li>• багаторівнева система безпеки;</li> <li>• більш мобільна система управління в порівнянні з конкурентами.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Доступний продукт в даному сегменті;</li> <li>• Використання інформаційних технологій для імітаційного представлення рекупераційних установок;</li> <li>• Візуальна оцінка роботи системи з рекупераційною установкою</li> </ul>

## 6.7. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції до товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 6.7.1 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару [27] .

**Таблиця 6.7.1 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару**

<b>Потреба</b>	<b>Вигода, яку пропонує товар</b>	<b>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</b>
Зменшення теплових виділень в навколишнє середовище	Повторне використання тепла, яке виляється під час протікання процесу	Можливість встановлення рекупераційних систем не загального плану, а саме на кожний апарат окремо
	Економія енергетичних, паливних ресурсів	Доступна цінова політика для споживача

	Оцінка роботи отриманої рекупераційної системи	Можливість оцінити якість системи
	Обігрів приміщень і підтримання мікроклімату рекупераційними системами	Уточнення всіх можливих ситуацій, для індивідуальної розробки рекупераційної системи

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 6.7.2), що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів.

**Таблиця 6.7.2 – Концепція маркетингових комунікацій**

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення
1.	Обережний вибір потенційних контрагентів, що зумовлено особливістю ринку з використання Технологій з повторним використанням тепла	Інтернет-розсилки	Технологія	Привернути увагу до рекупераційних систем шляхом індивідуального підходу до кожного технологічного апарату
2.		Спеціалізована ні видання	Технологія	
3.		Спеціалізовані виставки, форуми	Технологія	

## 6.8. Висновки

Переглянувши всі позитивні і негативні риси створення рекупераційних систем для технологічних процесів, можемо зробити висновок, що представлена ідея є актуальною та цілком адекватною для застосування на сьогоднішній день. Технологія є доступною у плані цінової політики та є можливість застосувати на власних підприємствах чи виробництвах.

Так як було отримано, що ринок – це монополістична конкуренція, то бар'єри входу на ринок досить високі. Наявні конкуренти більш високої концентрації та середнього рівня інтенсивності. Для ринкової реалізації проекту обрано стратегію диференційованого маркетингу, яка передбачає чітку ідентифікацію окремих сегментів, з якими планує взаємодіяти стартап, зокрема це галузі хімічного виробництва, де задіяна рекупераційна система для повторного використання тепла

і потрібне постійне повторне використання тепла, так як багато процесів протікають за високих температур під час яких виділяється велика кількість тепла в навколишнє середовище. Доцільна подальша імплементація проекту.

Розвиток запропонованого стартап-проекту буде пов'язаний з можливістю інтенсифікації економічного розвитку в Україні, бо життєздатність стартапу визначатиметься темпами зростання хімічної промисловості та споріднених галузей, де необхідно та доцільно застосувати створені рекупераційні системи

## ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської дисертації було розглянуто технологічний процес прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі. Тема роботи: «Система керування процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі».

Так як процес прожарювання вуглецевого матеріалу проходить не при постійній температурі, було проведено дослідження зміни температурних полів для отримання однорідної структури матеріалу на виході. Найвищими є температури біля пальника 1240 K та 1430 K, мінімальними є температури з протилежного боку печі близько 130 K та 93 K відповідно. Після проведених досліджень можна сказати, що при зменшенні витрати палива температура і перепад по температурі матеріалу зменшується, а при збільшенні витрати газу, температура матеріалу і перепад по температурі зростає, що для нашого випадку є недоцільним.

Було виконане спрощення математичної моделі печі для синтезу системи керування. Спрощення моделі полягає у апроксимації ANSYS-моделі простішими моделями, використовуючи залежності між температурами в різних точках. Метою цього є знаходження спрощеної моделі, що може передбачувати/оцінювати температури з малою похибкою по відношенню до ANSYS-моделі. Для спрощення моделі процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі було обрано метод апроксимації. Даний метод дає наближене вираження одних математичних об'єктів іншими, близькими за значенням, але простішими та дає можливість визначити передатні функції.

Головним завданням цієї магістерської дисертації було дослідити різноманітні системи керування, що могли б покращити теперішній стан управління температурним режимом в обертовій барабанній печі для отримання однорідного матеріалу після прожарювання. На основі створених систем можна зробити такі висновки, що краще зі своїм завданням справляється адаптивний ПІ-регулятор, так як в нього невелике перерегулювання та вихід на усталений рівень триває не так багато часу. Система керування з *LQR*-регулятором теж виходить на усталений рівень за короткий проміжок часу, але все ж таки там набагато більше перерегулювання, а тому система схильна до коливності. Перерегулювання в обох

випадках, як можна побачити на графіках, які представлені в розділі синтезу системи керування зростає при збільшенні вмісту вологості в матеріалі і нажаль змінити це поки не можливо навіть застосувавши інші регулятори.



## ЛІТЕРАТУРА

1. **Тугай Є. В., Жученко О.А.** Аналіз процесу прожарювання коксу та антрациту в обертовій барабанній печі [Текст] / Є. В. Тугай, О. А. Жученко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Матеріали Четвертої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2016); Київ, НТУУ «КПІ», 20–21 квітня 2017 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 138 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – 150 пр.

2. **Санников А. К., Сомов А. Б., Ключников В.В. и др.** Производство электродной продукции [Текст] / под ред. А. К. Санников. – Москва.: Металлургия, 1985. – 129 с. – Библиогр.: с. 39-47. – 1230.

3. *Український графіт* [Електронний ресурс]. Режим доступу-  
<http://ukrgrafit.zp.ua/uk/company>

4. **Кондратенко С. П.** Производство и применение графитовых электродов и углеродосодержащих материалов / Кондратенко С. П. // Гармония. Режим доступу:  
<http://www.garmony.com.ua/index.php/articles-vvod-brit-r-s-bril-s-brib-kondensator-ke-kes-kep-kek-kps-ket-kmps-keb-grafit-mpg-6-7/16-stati-po-tematike-grafit/44-elektrod-grafit>

5. *Трубчасті обертові печі* [Електронний ресурс]. Режим доступу-  
<http://ukrefs.com.ua/90993-Trubchatye-vrashayushiesya-pechi.html>

6. **Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г.** Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: [справочное издание] в 2-х книгах. Книга 1 / Под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2004. – 688 с.

7. **Питюлин И. Н.** Научно-технические основы создания каменноугольных углеродистых материалов для многогабаритных электродов: Монография. Харьков, 2004. - 480 с.

8. *Обертові барабанні печі* [Електронний ресурс]. Режим доступу-  
<http://ukrbukva.net/page,3,9334-Avtomatizaciya-processa-prokalki-koksa-v-trubchatoiy-vrashayusheiy-sya-pechi.html>

9. **П. В. Левченко** «Расчеты печей и сушил силикатной промышленности» [Текст] / Высшая школа – Москва, 1968 – 364с.

10. Пулинец И. В., Панов Е. Н., Каврацкий А. Я. и др. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий [Текст] /.; Монография – Київ, 2014 -172с.

11. Тугай Є. В. Математична модель процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі / Жученко О. А., Тугай Є. В., Коротинський А. П. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» – №2, 2018.

12. Тугай Є. В., Жученко О. А. Моделювання процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Тези доповідей Десятої науково-практичної конференції студентів. - Київ, НТУУ «КПІ», 8 грудня 2017 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2017..

13. Тугай Є. В., Жученко О. А. Математичне моделювання процесу прожарювання коксу і антрациту в обертовій барабанній печі [Текст] / Є. В. Тугай, О. А. Жученко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Матеріали П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2018); Київ, НТУУ «КПІ», 11 квітня 2018 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2018. – 140 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез.

14. Посібник по проектуванню систем керування [Електронний ресурс]. Режим доступу - [http://posibnyky.vntu.edu.ua/elek\\_s/7\\_1.htm](http://posibnyky.vntu.edu.ua/elek_s/7_1.htm)

15. Системи автоматичного керування [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://studopedia.su/12\\_141866\\_sistemi-avtomatichnogo-keruvannya.html](https://studopedia.su/12_141866_sistemi-avtomatichnogo-keruvannya.html)

16. Жученко О.А., Цапар В.С. Дослідження адаптивних систем керування: Метод. вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами» / Уклад.: О.А. Жученко, В.С. Цапар. – К., 2012. – 27 с.

17. Системи автоматичного керування [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.wikizero.com/ru/>

18. Чалых Е.Ф., Технология углеграфитовых материалов. М.: -Металлургия.-1963.-304 с.

19. **Пупкова К. А., Егупова Н. Д.** Методи класичної та сучасної теорії автоматичного управління: підручник в 5-ти тт .; 2-е изд., Перераб. про доп. Т.3: Синтез регуляторів систем автоматичного управління/ М .: Видавництво МГТУ ім. Н.Е. Баумана, 2004. - 616 с.
20. **Пупкова К. А., Егупова Н. Д.** Методи класичної та сучасної теорії автоматичного управління: підручник в 5-ти тт .; 2-е изд., Перераб. про доп. Т.4: Методи оптимізації систем автоматичного управління/Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова.- М .: Видавництво МГТУ ім. Н.Е. Баумана, 2004. - 744с.
21. **Ладанюк А.П.** Теорія автоматичного керування для студ. спец. напряму 0925 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” ден., заочн. та скороч. форм навчання – К.: НУХТ, 2006. – с.
22. *Пропорційно-інтегральний закон регулювання [Електронний ресурс].* Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Пропорційно-інтегральний\\_закон\\_регулювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/Пропорційно-інтегральний_закон_регулювання)].
23. *КИПИА портал – регуляторы [Електронний ресурс].* Режим доступу: <http://kipia-portal.ru/2016/02/23/regulatory/>
24. *Якість автоматичного регулювання [Електронний ресурс].* Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Якість\\_автоматичного\\_регулювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/Якість_автоматичного_регулювання)
25. *Що таке стартап [Електронний ресурс].* Режим доступу: [https://3222.ua/article/scho\\_take\\_startap.htm](https://3222.ua/article/scho_take_startap.htm)
26. *Преваги та недоліки рекуперативної вентиляції [Електронний ресурс]:* <http://uarecre.ru/10649-perevagi-ta-nedoliki-rekuperativnoi-ventiljacji.html>
27. **Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]** : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг.ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28с.
28. **Бутенко Н. В.** Маркетинг - 3. Маркетингові стратегії охоплення ринку. Процес оцінювання цільового сегмента, 2001. -123 с.

